INVESTIGACION y CIENCIA

ASI NACIERON LAS MEMORIAS MAGNETICAS

PLANTAS TRANSGENICAS

MECANISMO DARWINISTA DE LA ENFERMEDAD

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ORIGEN, COMPOSICION Y ALCANCE DE LOS METEORITOS



ENERO 1999
800 PTAS.



Enero de 1999 Número 268

SECCIONES



Portada: Don Dixon

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	Craig Kiefer; CNRI/SPL/Photo Researchers, Inc.; Laurie Grace
6	Craig Kiefer; Johnny Johnson (*gráfica*)
7	Craig Kiefer
10	Craig Kiefer
14-15	Don Dixon
16-17	Laurie Grace (*mapa*); Slim Films (*ilustración*); Jeffrey C. Wynn (*abajo*)
18	Carolyn Shoemaker (*arriba*); Slim Films (*abajo*)
19	Jeffrey C. Wynn
20	Joe Polimeni y Bill Chasteen, *Zahid Tractor Corp. y A. M. General Corporation*
21	David Morrison NASA *Ames Research Center*; Laurie Grace
22-23	Andy Ryan
24	Don Dixon
25	Laurie Grace (*arriba*); Andy Ryan (*abajo*)
26-27	Andy Ryan (*izquierda*), Hans Henrik Olsen (*centro y derecha*)
28-29	Andy Ryan
40-44	Bryan Christie
45	Fuente: Crystal Barrel Collaboration, CERN
46	Ralph Baker
47	Jonathan Blair, *Crocodile Photos*
48	John de Santis (*arriba*), William F. Haxby (*abajo*)
49	NASA (*arriba*), John de Santis (*abajo*)
50	Ian MacDonald
51	Charles R. Fisher y Rosemary Walsh, *Universidad del estado de Pennsylvania*
52-57	Ken Preston-Mafham
58-63	Mark Gerstein y Michael Levitt
64	Scientific American (*arriba*); Telebiblioteket-Tele Danmark; UPI/Corbis-Bettmann; Corbis-Bettmann; Emtec Magnetics
65	Ampex Archives; UPI/Corbis-Bettmann; Emtec Magnetics
66	UPI/Corbis-Bettmann; Mitre Corporation Archives; IBM Corp.
67	Bryan Christie (*arriba*); Ampex Archives; National Archives and Records Administration; Archive Photos (*audiocassette*), Blank Archives/Archive Photos (*cintas*)
68	UPI/Corbis-Bettmann; Donal Philby, *FPG International*; KTLA-Channel 5; Ken Cedeno, *Sipa*
70-79	M.ª Fernanda Nieto-Jacobo, Arturo Guevara-García y Luis Herrera-Estrella
82-83	Daniels & Daniels
84-85	George Retseck; Everett Collection de "*The Wedding Singer*"
86-87	Ian Worpole
89	Dusan Petricic

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

José M.ª Valderas Martínez: *Evolución y orígenes de la enfermedad* y *Nexos*; Mónica Murphy: *Meteoritos en el desierto* y *Meteoritos en hielos polares*; Juan P. Campos: *Glubolas*; Sònia Ambrós Albesa: *Vertidos naturales de petróleo*; Xavier Bellés: *Estrategias de cópula de las arañas*; Esteban Santiago: *El agua y las moléculas de la vida*; Xavier Roqué: *Un siglo de memorias magnéticas*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler, *On-Line Editor*; Mark Alpert, Carol Ezzell; Alden M. Hayashi; Madhusree Mukerjee; George Musser; Sasha Nemecek; David A. Schneider y Glenn Zorpette; Marguerite Holloway, Steve Mirsky y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Rolf Grisebach
PRESIDENT Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.150	20.700

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 91 662 10 00

para los restantes países:

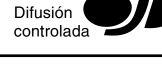
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

NUCLÉAIRE. «La primera reacción en cadena autoabastecida producida fuera de los países de habla inglesa acaban de conseguirla físicos franceses. Frédéric Joliot Curie, director de la Comisión Francesa para la Energía Atómica, anunció la entrada en funcionamiento, el mes pasado, de una pila de uranio en Fort Châtillon, en las afueras de París. Para los trabajadores estadounidenses, a quienes tantos esfuerzos costó refinar el uranio empleado en sus reactores, la capacidad de la pila de Châtillon para automantenerse con uranio impuro (óxido de uranio) supone cierta sorpresa.»

EL COMPLEJO DE EDIPO. «Freud sabía del complejo de Edipo por la tragedia *Edipo rey* de Sófocles. La cuestión estriba en si Freud acertaba al suponer que ese mito confirma su opinión de que los impulsos incestuosos inconscientes y el consiguiente odio hacia el padre-rival son intrínsecos a la naturaleza de todos los infantes varones. Mas si examinamos el mito más de cerca, surgen dudas. En él no hay indicio alguno que apunte a que Edipo se sienta atraído por Yocasta o de que esté enamorado de ella. El mito debe entenderse como símbolo, no de un vínculo incestuoso entre madre e hijo, sino de la rebelión de éste frente a la autoridad del padre en el seno de una familia patriarcal; la boda de Edipo y Yocasta simboliza la victoria del hijo que se apodera del puesto del padre y con ello de todos los privilegios.
—Erich Fromm»

...cien años

POLONIO Y RADIO. «Dos de nosotros hemos demostrado que, merced a un proceso puramente químico, de la pechblenda puede extraerse una sustancia intensamente radiactiva. Llegamos, por tanto, a la conclusión de que la pechblenda podría contener un nuevo elemento, para el que propusimos el nombre de polonio. Posteriormente, hemos topado con una segunda sustancia, intensamente radiactiva, y por completo distinta de la primera en sus propiedades químicas. Esta nueva sustancia radiactiva posee las propiedades del bario casi puro, aunque con unos cloruros 900 veces más radiactivos que el uranio. Creemos que la nueva sustancia radiactiva contiene un nuevo elemento, para el que proponemos el nombre de radio.
—M.P. Curie, Mme. P. Curie y M.G. Bémont»

MALOS AIRES. «El doctor G.B. Grassi albergó durante tiempo dudas acerca de la relación entre mosquitos y malaria, ello a causa de la ausencia de la enfermedad en ciertos distritos donde abundan los mosquitos. Ahora, una cuidadosa clasificación de las distintas especies de mosquitos le ha llevado a la conclusión de que la distribución de ciertas formas del insecto coincide muy ceñidamente con la distribución de la enfermedad. El *Culex pipiens* común debe considerarse inocuo. Por contra, una especie abundante (*Anopheles claviger*, Fabr.) conocida en Italia como 'zanzarone', o 'moschino', se encuentra siempre asociado a la malaria, y abunda donde se halla extendida la enfermedad.»



Edipo, rey de Tebas, con su reina, Yocasta

...ciento cincuenta años

BIOCIDAS PARA LA AGRICULTURA. «La revista *London Lancet* menciona entre las prácticas habituales de los agricultores ingleses la de remojar el trigo en un solución de arsénico antes de sembrarlo, para prevenir los estragos de los gusanos en los granos y de los pájaros en la planta ya crecida. Se afirma que el plan ha demostrado resultar un éxito destacado y que desde luego no ejerce ningún efecto deletéreo en la planta. En Hampshire, Lincolnshire y muchos otros distritos donde la práctica está extendida, se ha encontrado un gran número de perdices y faisanes muertos en los trigales, envenenados al comer las semillas. Se trata de una práctica condenable. Debemos ser capaces de alimentar tanto a los hombres como a los pájaros.»

CAUDALES DE NICOTINA. «En su *Tratado de las Enfermedades*, Prout dice del tabaco: 'Aunque reconocida como uno de los venenos naturales más virulentos, la influencia de esta nociva semilla es tan fascinante, que la humanidad recurre a ella de cualquier modo concebible para asegurarse su pasmosa y perniciosa acción. Son perfectamente conocidos los síntomas agudos y de dispepsia que presentan algunos inhaladores de rapé empedernidos; y yo he visto a esos casos acabar fatalmente en enfermedades malignas del estómago y el hígado. Sin duda, si se dejara prevalecer el dictado de la razón, no tardaría en proscribirse el uso común de un artículo tan nocivo para la salud y tan ofensivo por el modo en que se emplea.'»

UN DIAMANTE NOTABLE. «Koh-i-nor —o 'montaña de luz'—. Las tropas británicas han arrebatado a uno de los príncipes de la India un diamante de valor inestimable. Se proponen engarzarlo en el centro de la diadema de la reina Victoria.»

Evolución y orígenes de la enfermedad

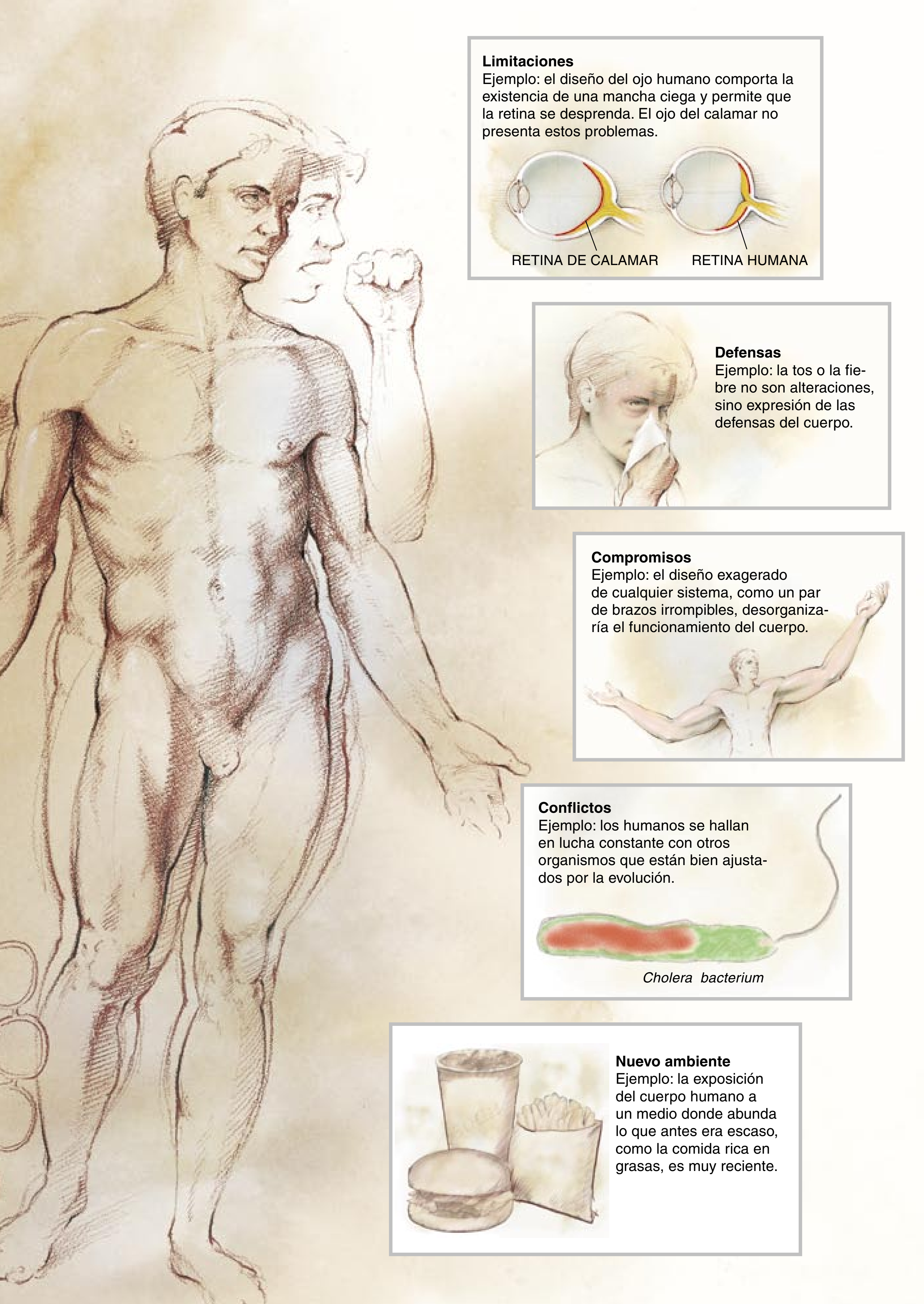
Los principios de la evolución por selección natural empiezan a aplicarse en medicina

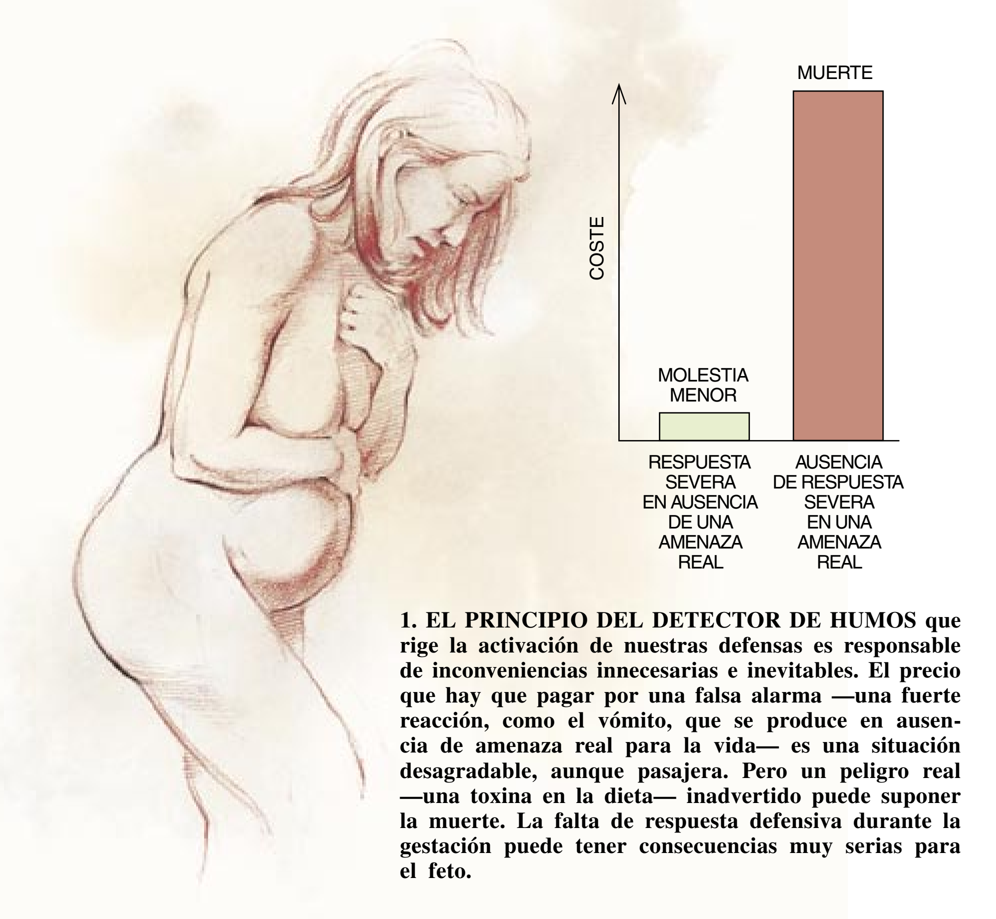
Randolph M. Nesse y George C. Williams

La contemplación detenida del cuerpo humano infunde respeto en pareja medida a la perplejidad que provoca. Fijémonos en el ojo, por ejemplo. El tejido transparente y vivo de la córnea describe la curva apropiada, el iris se adapta a la intensidad de la luz y el cristalino se ajusta a la distancia, todo de suerte tal que la cantidad óptima de luz quede enfocada exactamente sobre la superficie de la retina. La admiración que produce tamaña perfección cede pronto a la consternación. Contra toda lógica, los vasos sanguíneos y los nervios atraviesan la retina y forman una mancha ciega en su punto de salida.

El cuerpo es un cúmulo de contradicciones sorprendentes. Por cada exquisita válvula cardíaca tenemos una muela del juicio. Las mismas cadenas de ADN que gobiernan el desarrollo de los diez billones de células de un ser humano adulto permiten también su deterioro progresivo y, con el tiempo, la muerte. Nuestro sistema inmunitario identifica y destruye un millón de elementos extraños; aun así, son muchas las bacterias que nos pueden matar. Estas contradicciones producen la desagradable impresión de que el cuerpo ha sido diseñado por un equipo de magníficos ingenieros con la ayuda ocasional de un chapucero.

Pero lo que a primera vista parece una serie de despropósitos encierra sentido. El encontrarlo nos exige estudiar el origen de la vulnerabilidad del cuerpo urgidos por las avisadas palabras de Theodosius Dobzhansky: “Nada tiene sentido en biología si no es a la luz de la evolución.” Se puede afirmar que la


Limitaciones
Ejemplo: el diseño del ojo humano comporta la existencia de una mancha ciega y permite que la retina se desprenda. El ojo del calamar no presenta estos problemas.
RETINA DE CALAMAR
RETINA HUMANA
Defensas
Ejemplo: la tos o la fiebre no son alteraciones, sino expresión de las defensas del cuerpo.
Compromisos
Ejemplo: el diseño exagerado de cualquier sistema, como un par de brazos irrompibles, desorganizaría el funcionamiento del cuerpo.
Conflictos
Ejemplo: los humanos se hallan en lucha constante con otros organismos que están bien ajustados por la evolución.
Cholera bacterium
Nuevo ambiente
Ejemplo: la exposición del cuerpo humano a un medio donde abunda lo que antes era escaso, como la comida rica en grasas, es muy reciente.



1. EL PRINCIPIO DEL DETECTOR DE HUMOS que rige la activación de nuestras defensas es responsable de inconveniencias innecesarias e inevitables. El precio que hay que pagar por una falsa alarma —una fuerte reacción, como el vómito, que se produce en ausencia de amenaza real para la vida— es una situación desagradable, aunque pasajera. Pero un peligro real —una toxina en la dieta— inadvertido puede suponer la muerte. La falta de respuesta defensiva durante la gestación puede tener consecuencias muy serias para el feto.

biología evolutiva es el fundamento de toda biología y ésta, la base de toda medicina. Por ello sorprende que apenas ahora empecemos a reconocer el estatuto de la biología evolutiva como ciencia médica primaria. El estudio de los problemas médicos en el contexto de la evolución se ha dado en denominar medicina darwinista. La investigación médica se propone explicar las causas de la enfermedad del individuo y busca los tratamientos para curar, o al menos aliviar, las afecciones deletéreas. Semejante planteamiento se ha venido ciñendo a las cuestiones inmediatas, al estudio directo de los mecanismos anatómicos y fisiológicos. La medicina darwinista, por contra, se pregunta por qué el diseño del cuerpo humano le hace vulnerable al cáncer, la aterosclerosis, la depresión o la parálisis; dilata, pues, el horizonte y el contexto de la investigación.

Las explicaciones de tipo evolutivo relativas a la menesterosidad del cuerpo humano se estructuran en ciertas categorías, muy pocas. En primer lugar, algunos estados desagradables —el dolor, la fiebre, la tos, el vómito o la ansiedad— no constituyen tanto enfermedades o defectos de diseño cuanto defensas desarrolladas. En segundo lugar, los conflictos con otros organismos, y aquí vale lo mismo para *Escherichia coli* que para los cocodrilos, son inherentes a la vida. En tercer lugar, determinadas circunstancias (la disponibilidad de grasas en la dieta) son tan recientes, que la selección natural no ha tenido tiempo todavía de obrar sobre ellas. En cuarto lugar, ciertas peculiaridades pueden resultar del compromiso entre los beneficios que reportan y los inconvenientes que ocasionan. En un ejemplo clásico, el gen implicado en la anemia falciforme (drepanocitosis) protege de la malaria. Por último, el proceso de selección natural condiciona el desarrollo de diseños subóptimos, como en el caso de los ojos de los mamíferos.

La tos pudiera ser el mecanismo de defensa más útil. Los sujetos que no eliminan los cuerpos extraños de sus pulmones presentan mayor probabilidad de morir de neumonía. Benéfica es también la capacidad de sentir dolor. Los contados individuos que carecen de tal sensación tampoco experimentan molestia alguna cuando permanecen en la misma posición durante largo rato. Este estatismo antinatural dificulta el riego de las articulaciones y fomenta su deterioro. Tales individuos suelen morir precozmente en la edad adulta por lesión de los tejidos y por infecciones. Tos y dolor se reputan a menudo expresión de enfermedad o agresión; la verdad es que están más cercanos a la solución que al problema. Los sistemas de defensa desarrollados por la selección natural se mantienen en reserva hasta que se les necesita.

Quizá se haga más duro admitir la fiebre, el vómito, la diarrea, la ansiedad, la fatiga, el estornudo y la inflamación entre los mecanismos de defensa. La utilidad de la fiebre pasa inadvertida incluso para algunos médicos. Más que un incremento de la actividad metabólica, la fiebre es un aumento cuidadosamente regulado del punto de ajuste del termostato corporal. La subida de la temperatura corporal facilita la destrucción de los patógenos. Matthew J. Kluger, del Instituto Lovelace de Albuquerque, en Nuevo México, ha observado que los propios lagartos, animales de sangre fría, buscan lugares más templados cuando padecen una infección, para que su temperatura corporal se eleve varios grados por encima de la habitual. Si se les impide trasladarse a la parte más cálida de la jaula, se multiplica el riesgo de morir de infección. En otro estudio similar realizado por Evelyn Satinoff, de la Universidad de Delaware, las ratas viejas, que ya no pueden alcanzar las altas fiebres de sus compañeras de laboratorio, buscan instintivamente ambientes más calientes cuando sufren una infección.

La reducción de los niveles de hierro en sangre, otro mecanismo de defensa, se presta también a interpretación errónea. Quienes padecen infecciones crónicas presentan a menudo concentraciones inferiores a la normalidad. A veces se culpa de esa caída a la enfermedad, cuando se trata, por contra, de una respuesta protectora; durante la infección, el hígado secuestra el hierro para evitar que las bacterias accedan a elemento tan vital.

Tradicionalmente se ha considerado la náusea un enojoso efecto secundario de la gestación. Las náuseas coinciden con el período de diferenciación rápida del feto, época en que se manifiesta más vulnerable a la exposición a toxinas. La gestante que las experimenta tiende a restringir la ingesta de sustancias de sabor fuerte, potencialmente dañinas. Ante esa observación, Margie Profet planteó la hipótesis de que las náuseas del embarazo fueran una adaptación por la que la madre protegía al feto de la exposición a toxinas. Profet se aprestó a comprobar la hipótesis

RANDOLPH M. NESSE y GEORGE C. WILLIAMS son los autores del libro *Why We Get Sick: The New Science of Darwinian Medicine* ("Por qué enfermamos: la nueva ciencia del darwinismo médico"). Nesse enseña psiquiatría en la Universidad de Michigan, donde dirige el Programa de Evolución y Adaptación Humana del Instituto de Investigación Social. Williams, notorio teórico de la evolución, es profesor emérito de la Universidad de Nueva York en Stony Brook y director de *Quarterly Review of Biology*.

estudiando los resultados del embarazo. Halló, con suficiente seguridad, que el fruto de las mujeres con más náuseas presentaba menos malformaciones. (El estudio respalda la teoría, pero resulta todavía incompleto. Si la hipótesis de Profet es correcta, la investigación ulterior deberá descubrir que las hembras de muchas especies modifican sus preferencias dietéticas durante la gestación. Predice también un incremento de las malformaciones en los embarazos de mujeres con menos náuseas o sin náuseas en absoluto y que, como consecuencia de ello, hubieran seguido una dieta más variada durante la gestación.)

Parece obvio que el estado de ansiedad, muy común, se originase como mecanismo de defensa en situaciones de peligro para favorecer la huida y la evitación. En 1992, Lee A. Dugatkin, de la Universidad de Louisville, ponderó los beneficios del miedo en los gupis. Los clasificó en tímidos, cautos y temerarios, en función de su reacción ante la presencia de un pez potencialmente depredador, la perca americana de boca pequeña. Los tímidos se escondían, los cautos sencillamente nadaban en otra dirección y los temerarios se quedaban quietos y fijaban la vista en el posible verdugo. Dugatkin colocó a cada gupi solo en un tanque con la perca. Sesenta horas después, habían sobrevivido el cuarenta por ciento de los tímidos, por sólo un quince por ciento de los cautos. El completo exterminio de los temerarios, por su parte, facilita la transmisión de los genes del depredador más que los suyos propios.

La selección de genes que favorecen la ansiedad predice la existencia de personas que experimenten un exceso de ansiedad. Las hay. También debería haber individuos hipofóbicos, con un nivel de ansiedad insuficiente, ya sea por tendencias genéticas o por fármacos ansiolíticos. La naturaleza exacta y la frecuencia de este síndrome es asunto por establecer. Pocas personas acuden al psiquiatra quejándose de una aprensión insuficiente. Al flemático patológico tal vez haya que buscarlo en los servicios de urgencia, en las prisiones o en la cola del paro.

La utilidad de afecciones tan comunes y desagradables como la diarrea, la fiebre o la ansiedad, no se adivina de entrada. Si la selección natural determina los mecanismos que regulan las respuestas de defensa, ¿por qué las personas que recurren a fármacos para bloquearlas salen tan bien paradas, sin que inflijan a su cuerpo un daño obvio? La verdad es que a menudo nos hacemos un flaco servicio cuando nos interponemos en esos mecanismos.

Herbert L. DuPont, de la Universidad de Texas en Houston, y Richard B. Hornick, del Hospital Regional de Orlando, han estudiado la diarrea causada por *Shigella*. Descubrieron que las personas que tomaban antidiarreicos tenían una enfermedad de curso más largo e incapacitante que los que tomaron placebo. En otro ejemplo, Eugene D. Weinberg, de la Universidad de Indiana, ha documentado un aumento de las enfermedades infecciosas, en especial amebiasis, en determinadas zonas de Africa, donde se pretendía con la mejor intención corregir la deficiencia de hierro. Los suplementos orales de hierro no parecen afectar a personas con infecciones habituales —y sanas en lo demás—, en tanto que pueden ser muy nocivos para las malnutridas que padecen infecciones. No son capaces éstas de sintetizar una cantidad suficiente de proteínas ligadoras de hierro, que queda así libre para el metabolismo de los agentes infecciosos.

Hace poco se responsabilizó a un fármaco antinauseoso de producir efectos teratógenos. Parece que no se consideró la posibilidad de que el fármaco fuera en sí mismo inocuo para el feto y que la asociación a defectos congénitos se debiera a su interferencia con el mecanismo defensivo de la náusea materna.

Otro obstáculo para percibir los beneficios de las defensas deriva del carácter rutinario que se atribuye a las reacciones innecesarias de ansiedad,

Evolución de la virulencia

Los cambios de la virulencia de un agente infeccioso están relacionados con el momento evolutivo y el mecanismo de transmisión. Paul E. Ewald, del Colegio Amherst, ha determinado que la transmisión que requiere contacto directo suele llevar al patógeno a reducir su virulencia. De esta forma el huésped puede interaccionar con otros. En cambio, los intermediarios encargados de diseminar a los microorganismos, incluso a partir de huéspedes totalmente incapacitados, pueden redoblar la virulencia. La modificación de los hábitos, como la profilaxis sexual, también puede determinar cambios en el patógeno.



Vectores de enfermedades (mosquitos, manos de los profesionales de la salud, suministros de agua potable con deficiente higiene)
Sexo sin protección; promiscuidad



Transmisión de persona a persona (estornudo, tos, contacto cutáneo)
Sexo con protección; monogamia

dolor, fiebre, diarrea o náusea. La explicación requiere el análisis de las respuestas defensivas en el marco de una teoría de detección de señales. Una toxina de la sangre puede tener su origen en una sustancia presente en el estómago. El organismo puede eliminarla mediante el vómito, pero ha de pagar por ello un precio. El coste de una falsa alarma —el vómito que se produce cuando no hay toxina alguna que expulsar— son apenas unas calorías. Pero el tributo que satisface el silencio de una alarma auténtica —esto es, que no provoque el vómito en presencia de una toxina— puede suponer la muerte.

La selección natural tiende a estructurar los mecanismos de regulación con activadores sutilísimos, según el principio del "detector de humos". Una alarma de incendios fiable que despierte a una familia en caso de incendio, producirá necesariamente una falsa alarma cuando se queme una tostada. El tributo a pagar por los numerosos "detectores de humos" repartidos por el cuerpo humano es el sufrimiento a menudo innecesario. Este principio explica por qué al bloqueo de las defensas no sigue la mayoría de las veces un trágico desenlace. En buena medida, las reacciones defensivas se desencadenan ante estímulos insignificantes y su interferencia suele ser inocua. Casi todas las alarmas que evitamos al quitar la pila del detector de humos son falsas, por lo que esta estrategia puede parecer razonable. Hasta que algo arda.

La selección natural no puede dotarnos de una protección perfecta contra toda suerte de patógenos. Tienden éstos a evolucionar de forma mucho más rápida de lo que es capaz el hombre. La elevada tasa de reproducción de *Escherichia coli*, por ejemplo, le confiere más oportunidades de mutación y de selección en un solo día que a la humanidad en un milenio. Nuestras propias defensas, sean naturales o artificiales, actúan como una potente fuerza de selección, por cuya razón los patógenos se ven obligados a desarrollar sus defensas para no extinguirse. Paul W. Ewald, del Colegio Amherst, ha propuesto una clasificación de los fenómenos asociados a la infección según se beneficie de ellos el huésped, el patógeno, ambos o ninguno de los dos. Consideremos la mucosidad que acompaña a cualquier resfriado. La secreción nasal puede expulsar los patógenos, acelerar su transmisión a otros huéspedes o ambas cosas a la vez. Para averiguarlo habría que investigar y determinar si el bloqueo de las secreciones nasales acorta o prolonga la enfermedad. No abundan ese tipo de trabajos.

Con el desarrollo de los antibióticos y las vacunas la humanidad ha ganado importantes batallas en su guerra contra los agentes infecciosos. Las victorias brillaron tanto, que en 1969 William H. Stewart se atrevió a afirmar que había llegado "el momento de cerrar el libro de las enfermedades infecciosas". Se subestimó al enemigo y el poder de la selección natural. La realidad es que los patógenos parecen adaptarse a cualquier producto que los investigadores desarrollen.

La resistencia a los antibióticos ejemplifica una demostración clásica de los mecanismos por los que opera la selección natural. Las bacterias cuyos genes les permiten sobrevivir incluso en presencia del antibiótico, se reproducen en menos tiempo que las otras. De esta forma, los genes que confieren resistencia se diseminan con rapidez. Joshua Lederberg, de la Universidad Rockefeller, ha demostrado que estos genes pueden saltar de bacteria en bacteria incluidos en pequeños fragmentos infecciosos de ADN. Hoy en día, algunas cepas de tuberculosis de la ciudad de Nueva York resisten a los tres tratamientos antibióticos principales. Los pacientes infectados por estas cepas no tienen mejor pronóstico que los tuberculosos de hace un siglo. Stephen S. Morse, de la Universidad de Columbia, apunta que la cepa multirresistente que se ha diseminado por toda la costa este pudo emerger en un asilo próximo al Hospital Presbiteriano de Columbia. Este fenómeno sería previsible en un medio donde una feroz presión de selección elimina con rapidez las cepas menos virulentas. Los bacilos supervivientes se han seleccionado en razón de su resistencia.

Todavía hay quien cree en la trasnochada teoría según la cual los patógenos, tras una larga asociación con el huésped, caminan hacia la benignidad. Este prejuicio débese a una exposición superficial del problema. Un organismo que mate pronto a su hospedante quizá llegue a tiempo de infectar a otro. La selección natural primaría en este caso una virulencia baja. La sífilis, por ejemplo, era una enfermedad de extrema virulencia cuando entró en Europa, pero a medida que transcurrieron los siglos se volvió cada vez más benigna. La virulencia de un patógeno es, de todas formas, una característica circunstan-

Ambientes nuevos, peligros nuevos

Peligros para la salud, desde 2000 a.C. hasta la Edad Moderna

Accidentes

Inanición

Predadores

Enfermedades infecciosas



Peligros actuales para la salud (en culturas avanzadas)

Infarto y otras complicaciones de la aterosclerosis

Cáncer

Otras enfermedades crónicas asociadas a los hábitos de vida y la longevidad

Diabetes no insulinodependiente

Obesidad

Nuevas enfermedades infecciosas



cial en la vida del mismo. Aumentará o disminuirá en función de lo que en cada momento les resulte más ventajoso a sus genes.

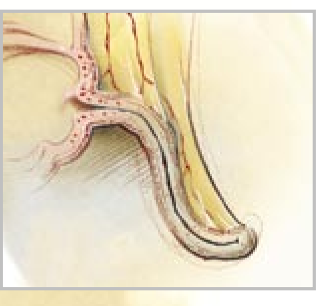
La virulencia baja suele ser ventajosa para el agente que se transmite directamente de un individuo a otro, pues permite al hospedante mantener su relación con nuevas víctimas potenciales. Otras enfermedades, así la malaria, se transmiten de forma igualmente eficaz, cuando no mejor, a partir de enfermos muy postrados. Este tipo de patógenos depende de vectores intermediarios (mosquitos); para ellos una virulencia elevada puede suponer una ventaja selectiva. El principio halla una aplicación directa en el control de las infecciones en los hospitales, donde las manos del personal sanitario pueden actuar de vectores que seleccionen las cepas virulentas.

En el cólera la red pública de distribución del agua y alcantarillado desempeña el papel de los mosquitos. Si el agua destinada al consumo o a la higiene se contamina con heces de los enfermos, la selección tiende a incrementar la virulencia de la bacteria. Cuanto mayor es la diarrea, mayor será la diseminación del organismo, aunque el sujeto hospedante muera. Ewald ha demostrado que, al mejorar la higiene, la selección actúa en contra del biotipo clásico de *Vibrio cholerae* y en favor del más benigno El Tor. En estas condiciones, la muerte del huésped es un callejón sin salida y un enfermo menos afectado y más móvil, capaz de contagiar a otros durante un período mucho más largo, es un vector eficaz para propagar el patógeno de baja virulencia. En otro ejemplo, una mayor higiene favorece que *Shigella sonnei* desplace a la más agresiva *S. flexneri*.

Estas consideraciones pueden ser de utilidad a la hora de diseñar las políticas sanitarias. A propósito del virus de la inmunodeficiencia humana (VIH) la teoría de la evolución prevé que con agujas limpias y medios profilácticos se consigue más que mediante tratamientos terapéuticos. Si nuestra misma conducta puede frenar las tasas de transmisión del VIH, las cepas que no acaben en poco tiempo con el huésped adquirirán ventaja selectiva a largo plazo; por contra, los virus más virulentos, los que acaben presto con la vida del huésped, verán limitada su capacidad de diseminación. Las medidas públicas pueden cambiar la naturaleza del VIH.

La pugna no se limita a los patógenos. Los grandes depredadores





2. LA PRESION de la evolución actúa en contra de los apéndices pequeños (*arriba*), porque la inflamación puede comprometer el flujo sanguíneo protector, empeorando el pronóstico de la infección. La evolución tiende a seleccionar apéndices grandes.

representaron antaño una auténtica amenaza para el hombre. Salvo en contados puntos, los grandes carnívoros han dejado de ser un riesgo. Mayor peligro revisten serpientes y arañas venenosas. Aunque resulta paradójico que las fobias provocadas por estas criaturas produzcan más daño que cualquier tropiezo real con ellas. Mucho más peligrosos que los predadores o los organismos venenosos son otros miembros de nuestra misma especie. Nos atacamos unos a otros, pero no para conseguir carne, sino por la pareja, el territorio o los recursos. Los conflictos violentos entre los individuos se dan sobre todo en jóvenes, que se agrupan en organizaciones que respalden sus intereses. Los ejércitos, cuyas filas se nutren también de hombres jóvenes, tienen objetivos parecidos y con un coste desmesurado.

Incluso las relaciones humanas más íntimas pueden convertirse en fuente de conflictos con secuelas médicas. Al principio, madre e hijo parecen compartir los mismos intereses, pero pronto divergen. Robert L. Trieves señala en un artículo clásico publicado en 1974 que, cuando el niño tiene unos pocos años de vida, los intereses genéticos de la madre pueden quedar mejor satisfechos con una nueva gestación, mientras que su retoño se beneficia de que se prolonguen los cuidados. Antes incluso del parto, ya existe un conflicto. Desde el punto de vista de la madre, el tamaño óptimo del feto es algo menor de lo que sería ideal para padre e hijo. De acuerdo con David Haig, de la Universidad de Harvard, el conflicto da pie a una carrera armamentística entre el feto y la madre por la regulación de los niveles de tensión arterial y de glucosa en sangre. A veces, el resultado es la aparición de hipertensión y diabetes del embarazo.

Un paseo por cualquier hospital recoge testimonios más que suficientes de las enfermedades que la humanidad se ha buscado. Los ataques al corazón, por ejemplo, se deben en su mayoría a aterosclerosis, un problema de nuestro siglo y raro antaño. La investigación epidemiológica proporciona la información necesaria para controlar la enfermedad. Bastaría con limitar la ingesta de grasas, comer mucha verdura y realizar ejercicio diario. Sin embargo, proliferan las hamburgueserías, las comidas dietéticas acumulan polvo en los estantes y los aparatos de gimnasia sólo sirven de improvisados roperos. En Estados Unidos, la proporción de obesos, cifrada en un tercio, sigue aumentando. Si sabemos lo que nos conviene, ¿por qué tomar decisiones que perjudican?

Las elecciones relativas a la dieta y el ejercicio dimanan de cerebros diseñados para hacer frente a un entorno distinto del que nos rodea hoy en día. La estructura humana se ajustaba mejor a la sabana africana, donde la grasa, la sal y el azúcar eran escasos y preciosos. Los individuos con tendencia a consumir grandes cantidades de grasa cuando se les presentaba la rara ocasión tenían una ventaja selectiva. Para ellos era más probable sobrevivir a las hambrunas que diezmaban a sus estilizados compañeros. Nosotros, que descendemos de ellos, conservamos esa urgencia por hartarnos, cuando ya no escasea la comida. La humanidad ha creado una sociedad que nada en leche y miel, para ver cómo ese éxito se ha trocado en origen de enfermedades modernas y de muertes precoces.

Tenemos también acceso cada vez más franco a diversos tipos de drogas, en particular alcohol y tabaco, culpables de una elevada proporción de enfermedades, de la carestía de la sanidad y de muertes anticipadas. Si bien los individuos han recurrido siempre a substancias psicoactivas, el problema se ha agravado con la disponibilidad de drogas concentradas y vías de administración directas, especialmente mediante inyección. La mayoría de estas sustancias —nicotina, cocaína y opio, por ejemplo— son productos de la selección natural para proteger de los insectos a las plantas. Los humanos compartimos con los insectos un bagaje genético común y la mayoría de estas substancias también afectan a nuestro sistema nervioso.

No cabe, pues, restringir la vulnerabilidad a individuos problemáticos o a sociedades desordenadas. Todos nosotros nos hallamos expuestos en razón de la larga historia de interacción de nuestra bioquímica con las drogas.

El incremento rápido y reciente de la incidencia de cáncer de mama probablemente obedezca también a cambios operados en el entorno y en los hábitos de vida; sólo unos pocos casos serían atribuibles a aberraciones genéticas. De acuerdo con los trabajos del grupo de Boyd Eaton, de la Universidad de Emory, las tasas de cáncer de mama en las sociedades “no modernas” actuales representan sólo una pequeña fracción de la registrada en Estados Unidos. Plantean la hipótesis de que el lapso que transcurre entre la menarquía y la primera gestación es un factor de riesgo crucial, al igual que el número total de ciclos menstruales. En sociedades de cazadores-recolectores, la menarquía ocurre a los quince años o más tarde, seguida en pocos años por una gestación, dos o tres años de puerperio y de nuevo, en poco tiempo, otra gestación. La mujer sólo menstrúa desde el final del puerperio hasta la siguiente gestación; durante este período las hormonas alcanzan niveles elevados que pueden lesionar las células mamarias.

En las sociedades modernas la menarquía ocurre a los doce o trece años, probablemente, al menos en parte, por una ingesta de grasa suficiente como para permitir a una mujer jovencísima alimentar al feto,

Algunos principios de la medicina darwinista

El enfoque darwinista propicia una nueva perspectiva. Los principios siguientes dan fundamento a la consideración de la salud y la enfermedad en un contexto evolutivo:

Las **DEFENSAS** y las **ALTERACIONES** son dos manifestaciones de enfermedad fundamentalmente diferentes

La **SUPRESION** de las defensas tiene ventajas e inconvenientes

La selección natural ha determinado la regulación de los sistemas de defensa según el **PRINCIPIO del DETECTOR de HUMOS**, lo que implica que la activación de las defensas y las molestias que se le asocian sean a menudo innecesarias para el sujeto

En la epidemiología moderna desempeña un importante papel el desajuste entre el **DISEÑO FISIOLOGICO** y los **ASPECTOS NUEVOS** de nuestro ambiente

Nuestros **DESEOS**, aunque encaminados en nuestro ambiente original a llevarnos a acciones de mayor éxito reproductor, ahora nos abocan a la enfermedad y a la muerte prematura

El cuerpo es un cúmulo de **COMPROMISOS**

No existe el "cuerpo **NORMAL**"

No existe el "genoma humano **NORMAL**"

Algunos **GENES** que se asocian a enfermedad pueden proporcionar también beneficios. Otros sólo causan enfermedad cuando interaccionan con factores ambientales nuevos

El **INTERES GENETICO** guía las acciones individuales incluso a expensas de la salud y la longevidad del individuo creado por esos genes

La **VIRULENCIA** es una propiedad de los patógenos; puede aumentar o disminuir

Los **SINTOMAS** de una infección pueden beneficiar al patógeno, al huésped, a ambos o a ninguno

La enfermedad es **INEVITABLE** debido a la forma en que la evolución caracteriza a los organismos

Toda enfermedad precisa una **EXPLICACION INMEDIATA** de por qué afecta a algunos individuos y a otros no y una **EXPLICACION EVOLUTIVA** de por qué los miembros de una especie son vulnerables

Las enfermedades no son productos de la selección, pero la mayoría de las **VULNERABILIDADES** que conducen a la enfermedad obedecen a causas evolutivas

El envejecimiento es más un **COMPROMISO** que una enfermedad

Las recomendaciones clínicas específicas deben basarse en **ESTUDIOS CLINICOS**; las intervenciones clínicas que sólo tienen fundamento teórico no se pueden considerar científicas y pueden resultar lesivas

---

mientras que la primera gestación tendrá lugar en décadas sucesivas o tal vez nunca. Una cazadora-recolectora tendrá un total de ciento cincuenta ciclos, mientras que en las sociedades modernas una mujer normal sumará 400 o más ciclos. Pocos se atreverían a propugnar que las mujeres quedaran embarazadas durante la adolescencia para prevenir el cáncer de mama, pero la administración de dosis importantes de hormonas para simular la gestación podría reducir el riesgo. En la Universidad de California en San Diego se llevan a cabo ensayos clínicos para comprobar esta hipótesis.

Toda adaptación implica un compromiso. Si los huesos del brazo triplicaran su diámetro actual, resistirían casi cualquier fractura, pero el *Homo sapiens* quedaría reducido a un armario ambulante ávido de calcio. A veces sería útil que el sentido del oído fuera más fino, pero nos distraeríamos con el sonido de las moléculas de aire chocando contra el tímpano.

Otro tanto plantea la genética. Si una mutación ofrece una ventaja neta en la reproducción, su frecuencia en la población tenderá a aumentar, aunque conlleve un aumento de la vulnerabilidad a alguna enfermedad. Las personas con dos copias del gen de la anemia falciforme padecen dolores terribles y mueren jóvenes. Los individuos con dos copias "normales" tiene una alto riesgo de muerte si contraen la malaria. Pero los individuos con una copia de cada gen están protegidos contra la malaria y contra la anemia. Allá donde se impone la malaria, estos individuos se hallarán mejor adaptados, en el sentido darwinista, que los individuos de los otros dos grupos. El gen de las células falciformes se selecciona en lugares exentos de malaria, aunque va asociado a otra enfermedad. ¿Cuál es el alelo "sano" en este ambiente? Es una pregunta sin respuesta. No existe un genoma humano que se pueda considerar "normal", sólo hay genes.

Muchos de los genes cuya presencia se asocia a alguna enfermedad tienen que haber reportado algún bien, al menos en ciertos entornos, o no serían tan comunes. La fibrosis quística mata a uno de cada 2500 caucasianos, por lo que los genes responsables deberían tener una alta probabilidad de desaparecer del acervo génico. Durante años, los investigadores han atribuido una presumible ventaja a la persistencia del gen de la fibrosis quística, igual que en el caso de la anemia de células falciformes. Gerald B. Pier, de la Facultad de Medicina de Harvard, respalda ese razonamiento. Los individuos con una copia del gen muestran una menor probabilidad de contraer fiebre tifoidea, que tiempo atrás provocaba una mortalidad del 15 por ciento.

El envejecimiento puede ser el ejemplo definitivo de compromiso genético. En 1957, uno de nosotros (Williams) propuso que los genes causantes del envejecimiento, y la muerte andando el tiempo, podrían se-

leccionarse si ejercieran otros efectos que ofrecieran algún tipo de ventaja en la juventud, época en que la fuerza de la selección es mayor. Pensemos en un hipotético gen que regulara el metabolismo del calcio de forma que favoreciera una reparación rápida de los huesos y a la vez determinara el depósito progresivo de calcio en las paredes arteriales. Dicho gen podría seleccionarse, aunque por ello murieran algunas personas ancianas. La influencia de genes pleiotrópicos (los que tiene muchos efectos), estudiada en moscas de la fruta y en escarabajos de la fruta, se desconoce todavía en humanos. En este contexto, la gota reviste un interés especial. Aparece cuando se forman cristales de ácido úrico, un potente antioxidante, que precipitan en las articulaciones. Los antioxidantes frenan el envejecimiento y se ha observado que los niveles plasmáticos de ácido úrico en distintos primates guardan correlación con el promedio de vida adulta. Tal vez los altos niveles de ácido úrico benefician a la mayoría de los humanos enlentenciendo el envejecimiento de los tejidos. La factura la pagan algunos en forma de gota.

Otros rasgos contribuyen al envejecimiento prematuro. Unas defensas inmunitarias potentes previenen la infección, pero también producen un daño continuado de baja intensidad a los tejidos. Cabe, por supuesto, la posibilidad de que la mayoría de los genes que producen el envejecimiento no reporte beneficio alguno en ninguna etapa de la vida. Sencillamente nunca habría decrecido la capacidad de reproducción en el ambiente natural en la medida necesaria para forzar su selección negativa. De aquí a unos decenios se identificarán genes responsables del adelantamiento de la senescencia. La ciencia podrá obstruir su acción, si no revertir su curso. Pero antes de intervenir habrá que averiguar si esos genes confieren alguna ventaja en épocas tempranas de la vida.

La evolución actúa en el sentido de la flecha del tiempo. El diseño de un organismo está limitado por las estructuras preexistentes. El ojo de los vertebrados está organizado al revés del órgano del calamar, donde vasos sanguíneos y nervios están situados por fuera, penetran lo necesario y fijan la retina para evitar su desprendimiento. El ojo humano es cuestión de mala suerte: hace cientos de millones de años, la capa de células de nuestros antepasados que devino sensible a la luz estaba en una situación opuesta a la correspondiente capa de los antepasados del calamar. Cada diseño evolucionó de forma independiente por un camino que no admite retorno.

La dependencia que ata al camino recorrido explica por qué la mera deglución puede resultar peligrosa para la vida. Nuestros aparatos respiratorio y digestivo se cruzan porque en un pez pulmonado que nos precedió la abertura respiratoria superficial estaba colocada en lo alto del morro, como es natural, y conducía a un espacio que compartía con el aparato digestivo. La selección natural no puede partir de cero y los humanos vivimos con la amenaza constante de que la comida se quede atravesada en la entrada de los pulmones.

El proceso de la selección natural puede también desembocar en un callejón sin salida, fatal a veces, al menos en potencia. Es el caso del apéndice, un vestigio de una cavidad que en nuestros antepasados se empleaba para la digestión y ha tiempo que no desempeña tal función. Dado que su infección puede tener un desenlace letal, cabría suponer que la selección forzara su desaparición. Pero la realidad es más compleja. La apendicitis aparece cuando una inflamación causa un aumento del tamaño del apéndice y la arteria que lo irriga queda comprimida. El flujo sanguíneo protege de la infección bacteriana y su compromiso la favorece. La infección provoca, a su vez, una mayor inflamación. Cuando el aporte de sangre queda cortado, las bacterias tienen vía libre para proliferar y el apéndice puede llegar a perforarse. Un apéndice delgado es especialmente vulnerable a esta cadena de acontecimientos, así que la apendicitis induce la selección de apéndices grandes. Lejos de considerar el cuerpo algo perfecto, el análisis evolutivo revela que portamos legados muy desafortunados que, en algunos casos, la misma selección natural se encarga de perpetuar.

Pese a la potencia del paradigma darwinista, dista mucho de haber adquirido la biología evolutiva estatuto de disciplina básica de la medicina. La enfermedad supone un alejamiento de la idoneidad y alguien podría aducir que la selección explica la salud, no la enfermedad. El enfoque darwinista sólo tendrá sentido si se cambia el objeto de la explicación. Para ello hay que centrarse en las características que nos hacen vulnerables a la enfermedad, no en ésta. Tampoco es verdad que la selección natural potencie la salud; lo que maximiza es el éxito reproductor de los genes. Los genes que favorezcan ese éxito reproductor abundarán más, aunque comprometan en última instancia la salud del individuo.

El desarrollo histórico y, en no menor medida, las interpretaciones descarriadas han dificultado la aceptación de la medicina evolutiva. En el enfoque evolutivo del análisis funcional podrían sospecharse reminiscencias de teleologías ingenuas o del vitalismo, desterrados ya del pensamiento médico. Por último, allá donde evolución y medicina aparecen juntas asoma el espectro de la eugenesia. El enfoque darwinista facilitará un mejor conocimiento del cuerpo humano que reportará beneficios a los individuos. Ello no significa que podamos o siquiera debamos plantearnos mejorar la especie. Antes bien, la aproximación evolutiva sugiere que aparentes defectos genéticos pueden esconder un significado adaptativo inadvertido, que no existe un genoma “normal” y que las nociones de “normalidad” son simplistas.

La aplicación sistemática de la biología evolutiva a la medicina es una empresa novedosa. Al igual que la bioquímica de principios de siglo, la medicina darwinista necesitará un período de desarrollo en la incubadora hasta que pueda mostrar su potencia y rendimiento.

El punto de vista evolutivo descubre las profundas conexiones entre los estados de enfermedad y normal. Es capaz de integrar líneas de investigación alejadas entre sí, dar pie a nuevas ideas y plantear áreas inéditas de investigación. Su utilidad y poder han de desembocar en el reconocimiento de la biología evolutiva como una ciencia médica básica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EVOLUTION OF INFECTIOUS DISEASE. P. W. Ewald. Oxford University Press, 1994.

DARWINIAN PSYCHIATRY. M.T. McGuire y A. Troisi. Harvard University Press, 1994.

EVOLUTION IN HEALTH AND DISEASE. Dirigido por S. Stearns. Oxford University Press, 1998.

EVOLUTIONARY MEDICINE. W. R. Trevathan y cols. Oxford University Press (en prensa).

Meteoritos en el desierto



Jeffrey C. Wynn y Eugene M. Shoemaker



Imagínese por un instante en medio del desierto. Anochece por el noroeste. Es un paisaje desolado donde por doquier se extienden vastas dunas móviles de arena grisácea. Ni una roca, ni un alma en 250 kilómetros a la redonda. Pese al ocaso solar, el termómetro señala 50 grados. A su espalda rugen los últimos estertores de la tormenta de la tarde. El viento dominante viene del sur, como siempre a principios de la primavera.

De pronto, se enciende en el horizonte una luz brillante. Sólo una chispa, que se abre en al menos cuatro barras distintas. Apenas unos segundos, y su resplandor nos ciega. Nos quema la ropa. Pasan sigilosos esos objetos sobre nuestra cabeza. Hasta que un ruido bronco nos ensordece. Tiembla la tierra a nuestros pies y una onda de choque nos lanza a unos 50 metros. Hemos dejado atrás frentes de fuego que se elevan al firmamento, mientras vuelan por los aires grandes rocas blancas. Unas se estrellan contra la arena; otras las devora el fuego.

Un fluido incandescente cubre las rocas blancas. Los goterones parecen primero de pintura blanca; a medida que se solidifican se tornan amarillos, naranjas, rojos y negros. Esa secuencia ocurre en los contados segundos que tarda la roca en chocar contra



EN EL YACIMIENTO DE WABAR hay tres cráteres y dos tipos muy peculiares de roca dispersos por el lugar: vidrio negro e "impactita". En su mayor parte, el enclave está sumergido bajo la arena de los médanos siempre en movimiento. Está situado en el corazón del gran yermo de Arabia Saudí, el Rub'al-Khali. Las expediciones de los autores siguieron dos rutas distintas (*mapa*).

el suelo. Algunos fragmentos, empapados de esta sustancia negra, se convierten por metamorfosis en una materia vítrea, espumosa, tan ligera que podría flotar sobre el agua, si la hubiese. Una nube irisada en forma de seta pasa, llevada por el viento sur, sobre nuestra cabeza. A medida que las rocas se vuelven espuma y va cayendo una lluvia entre negra y roja de vidrio derretido, terminamos por integrarnos en el espectáculo y no con el mejor de los finales.

En el corazón del legendario yermo de Arabia Saudí, el Rub'al-Khali, hay una zona extraña, de medio kilómetro cuadrado, cubierta de vidrio negro, roca blanca y trozos de hierro. El mundo supo de ella en 1932 gracias a Harry St. John "Abdullah" Philby, explorador británico y padre del agente doble soviético Kim Philby. Varias generaciones de nómadas beduinos al-Murra habían llamado al paraje *al-Hadida*, "las cosas de hierro".

Se cuenta en el Corán y en otros escritos árabes clásicos que cierto rey idólatra, de nombre Aad, se burló de un profeta de Dios. Por su impiedad, la ciudad de Ubar fue arrasada con todos sus habitantes por una nube transportada sobre las alas de un gran viento. Cuando los viajes de Philby le llevaron al prohibido yermo, sus guías le dijeron haber visto la ciudad destruida. Se ofrecieron a conducirle. Philby aceptó la invitación; transcribió en sus informes el nombre del lugar como "Wabar", denominación que ha perdurado desde entonces.

No encontró ni la ciudad perdida de Ubar, ni halló el origen de la historia del Corán. Pero allí había ocurrido un cataclismo venido del cielo. No cabía duda. A juzgar por los restos del impacto de un meteorito, la colisión equivalió a una explosión nuclear de doce kilotones, comparable a la bomba de Hiroshima. No fue el peor impacto de los que han dejado cicatrices en nuestro planeta, lo que no obsta para que Wabar ocupe un sitio especial en la investigación de los meteoritos. Casi todos los impactos conocidos en la Tierra han tenido lugar en roca sólida, o en rocas cubiertas por una delgada capa de tierra o agua. El choque de Wabar se produjo, sin embargo, en medio del mayor océano de arena del mundo. El de geología más elemental, se trata también del yacimiento meteórico mejor conservado, merced a su emplazamiento, aislado y seco. De las 160 estructuras de impacto que se conocen, es una de las 17 que guardan todavía restos del cuerpo que se estrelló.

Con tres durísimas expediciones hasta el interior del desierto hemos reconstruido el episodio de Wabar. El impacto fue una repetición más de algo que ha sucedido a lo largo de la historia de nuestro planeta. El sistema solar no ha dejado de ser un campo de tiro. Aunque los meteoritos de mayor tamaño acaparan la atención, la amenaza más tangible para nuestras ciudades son objetos menores, de la talla del caído en Wabar. Mediante el estudio de ese y de otros lugares podemos calcular la frecuencia de impacto de tales proyectiles.

¿Cómo conocían Wabar los beduinos de Philby, emplazada en medio de un colosal campo de médanos sin hitos de referencia, en un paraje que cambia casi a diario? Hasta los guías de desierto, de dureza acreditada, evitan acercarse al Rub'al-Khali. Philby empleó casi un mes en llegar, varios camellos sucumbieron por el camino y el resto acabó al borde de la muerte. En su informe ante la Real Sociedad de Geografía, de vuelta en Londres en 1932 afirmaba: "daba pena verlos cuando al decimonoveno día alcanzamos La Meca, escuálidos, sin joroba, sarnosos".

Era el segundo occidental que cruzaba Rub'al-Khali. (Le precedió otro



JEFFREY C. WYNN y EUGENE M. SHOEMAKER trabajaron juntos en el Servicio Geológico de los Estados Unidos hasta el fallecimiento del segundo en accidente de automóvil en julio de 1997. Ambos responden a la estampa romántica del geofísico intrépido. Wynn ha cartografiado el fondo marino con sensores eléctricos, gravitatorios, sísmicos y remotos. Ha examinado yacimientos minerales y estudiado acuíferos y enclaves arqueológicos. Entre 1987 y 1990 fue jefe de la misión del Servicio en Venezuela, y en Arabia Saudí entre 1991 y 1995. Su coche se ha averiado en los desiertos más remotos del sudoeste americano, en el Sahara occidental y en el corazón de la selva amazónica. Shoemaker, padre de la astrogeología, reconoció la importancia geológica de los impactos. Fundó en Flagstaff la instalación del Servicio donde se entrenaron los astronautas del Apolo; buscó asteroides que cruzasen la órbita terrestre y cometas desde el Observatorio de Palomar. La muerte le sobrevino mientras cartografiaba estructuras de impacto en la Australia profunda con su mujer, Carolyn Shoemaker.

explorador británico, Bertram Thomas.) Buscó artefactos, restos de paredes. Sus guías le mostraron las perlas negras que decoraban el terreno, joyas, decían, de las mujeres de la ciudad destruida. Philby estaba confundido y decepcionado. Sólo veía escoria negra, pedazos de arenisca blanca y dos depresiones circulares medio enterradas que le recordaban a un volcán. Uno de sus guías le enseñó un trozo de hierro del tamaño de un conejo. ¿Creación de una comunidad pretérita? Philby cayó por fin en la cuenta de que el fragmento de metal oxidado no era de este mundo. Pruebas de laboratorio habrían de demostrar más tarde que la roca constaba en un 90 por ciento de hierro, entre un 3,5 y un 5 por ciento de níquel y entre cuatro y seis partes por millón de iridio, un elemento de los llamados siderales, rara vez encontrado en la Tierra, aunque común en los meteoritos.

La ubicación genuina de la ciudad de Ubar, en el sur de Omán, unos 400 kilómetros al sur de Wabar, fue descubierta en 1992 gracias a las imágenes de los satélites. Mientras, apenas si se exploró Wabar hasta nuestras expediciones de mayo y diciembre de 1994 y marzo de 1995. El enclave, visitado al menos en dos ocasiones desde 1932, no se investigó a fondo.

Conocimos la razón la primera vez que acudimos. Wynn se apuntó a una excursión organizada por la *Zahid Tractor Corporation*, concesionaria saudí del *Hummer*, versión civil del vehículo militar *Humvee*. Con vistas a promocionar las ventas, un grupo de gerentes de la Zahid, entre ellos Bill Chasteen y Wafa Zawawi, se propuso la travesía del Rub'al-Khali e invitó a la misión del Servicio Geológico de los Estados Unidos en Yidda a que mandase a uno de sus técnicos. No se trataba de ninguna excursión campestre. El proyecto requirió un equipamiento especial y dos meses de planificación. Nadie había logrado cruzar el Rub'al-Khali en verano. Si algo fallaba, si uno de los vehículos se averiaba, la caravana quedaría aislada: la distancia, las altas temperaturas y las dunas irregulares impiden maniobras de rescate por helicópteros o aviones.

Un vehículo normal con tracción a las cuatro ruedas tardaría de tres a cinco días en cubrir los 750 kilómetros que separan Riad de Wabar. Se vería atrapado en la arena cada 10



1. CRATER LLENO DE ARENA, de 11 metros de diámetro, descubierto por los autores durante su tercera expedición a Wabar en diciembre de 1994. Bajo la arena, el cráter está revestido de impactita, roca poco común que se formó cuando una enorme presión compactó los granos de arena. Por el borde del cráter encontramos esquirlas de hierro y níquel de un centímetro de tamaño. A juzgar por la magnitud del accidente del terreno, se acepta que el meteorito causante del mismo al estrellarse contra la arena era denso, metálico, de sólo un metro de ancho. Sería un fragmento que se desprendió de los dos cuerpos mayores que abrieron los otros dos cráteres de Wabar.

Identificación de los cráteres de impacto

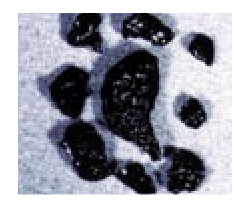
¿Cómo reconoceríamos un cráter de impacto? No es tarea fácil. La Luna está cubierta de cráteres, pero no tiene agua, ni meteoros, ni deriva continental: los cráteres se quedan donde se formaron, sin cambiar apenas a lo largo de los eones. En la Tierra, en cambio, todos estos factores han erosionado una superficie; sin ese proceso, habría estado también llena de marcas. Por si fuera poco, hay fenómenos más conocidos —la actividad volcánica, la erosión— que también dejan agujeros redondos. Sólo a principios de siglo confirmaron los geólogos que algunos cráteres fueron creados por el impacto de meteoritos. Se conocen únicamente 160 estructuras de impacto.

Un escaso dos por ciento de los asteroides que flotan por el sistema solar son de hierro y níquel; no cuesta reconocer sus fragmentos como cuerpos extraños al lugar. Pero los meteoritos de otros tipos se confunden con las piedras y rocas del terreno. En la Antártida es más fácil encontrarlos: poca piedra hay en medio de un campo de hielo. Para descubrir un cráter de meteorito en otros lugares se requiere una cartografía cuidadosa y trabajar en el laboratorio. Los geólogos buscan varios rasgos característicos, creados por las enormes velocidades y presiones del impacto. Ni siquiera una erupción volcánica somete la roca a esas condiciones.

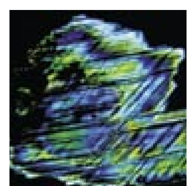
• **Conos rotos.** Estas impresiones se encuentran en las rocas que rodean a los cráteres. Semejan galones en forma de V. Si los conos han sufrido una fractura longitudinal, aparecen en afloramientos de roca. En Wabar no hay conos rotos porque el impacto se produjo contra la arena.



• **Tipos de rocas de altas temperaturas.** En Wabar y en lugares donde se han realizado pruebas nucleares se observan bloques de arena compactada y laminada. Las tectitas —rocas vítreas que se cree se forman cuando salta roca fundida al aire y se solidifica al volver al suelo— aparecen alrededor de numerosos yacimientos de impacto grandes.



• **Deformación microscópica de la roca.** La estructura cristalina de algunos minerales se transforma al paso de las ondas de choque que se producen durante el impacto. El cuarzo, por ejemplo, desarrolla unas estrías orientadas en más de una dirección. Puede recristalizarse y formar nuevos minerales, como la coesita y la stishovita, detectables sólo mediante la difracción de rayos X.

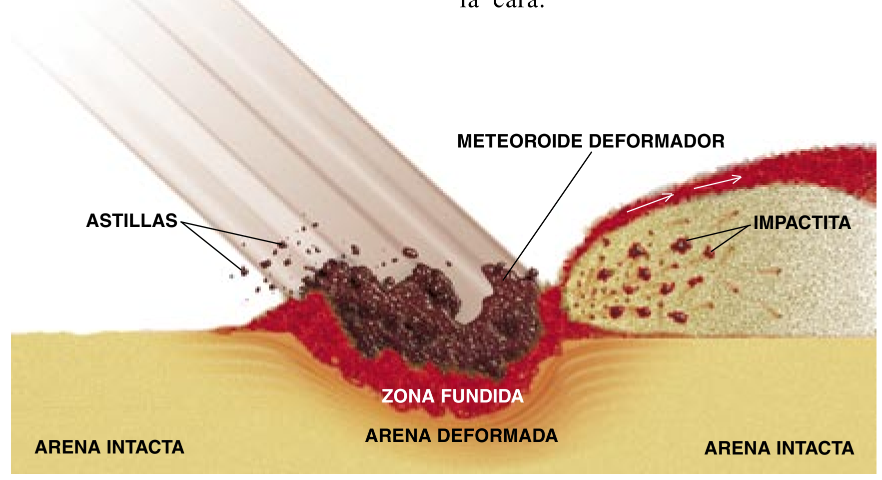


minutos o así; necesitaría escalas de arena y tornos. Un *Hummer* presenta la ventaja de que la presión de los neumáticos cambia con el avance del vehículo. Con todo, los conductores de la expedición tardaron días en aprender a moverse por las dunas. Si se tiene experiencia, el viaje a Wabar dura 17 largas horas; en las últimas todo es cruzar dunas, y ha de ser en la oscuridad, para que los focos halógenos de los parachoques descubran los precipicios de arena, sus impredictibles caídas de 15 metros.

Nuestra primera expedición permaneció en el lugar unas cuatro breves horas antes de proseguir camino. Para entonces ya sólo contábamos con aire acondicionado en cuatro de los seis vehículos. La temperatura en el exterior era de 61 grados a la sombra, con una humedad del dos por ciento, una décima parte de lo que en cualquier otra parte del mundo llamamos tiempo "seco". Wynn salió para realizar un estudio geomagnético; cuando regresó no se tenía en pie y parloteaba una mezcla incoherente de inglés y árabe. No se despejó hasta que no le echaron agua por la cabeza y aire frío a la cara.

Zahid también financió la segunda y la tercera excursiones. En la tercera, que duró una semana, el campamento sucumbió dos veces al efecto devastador de las tormentas de arena y la temperatura nunca bajó de los 40 grados, ni siquiera de noche. Todos teníamos junto a la cama un termo de dos litros porque el escozor de la garganta interrumpía el sueño cada hora.

Wabar ocupa una superficie de 500 por 1000 metros. Hay al menos tres cráteres, de dos de los cuales (de 116 y 64 metros de ancho) ya dio noticia Philby; el tercero (de once metros de ancho) lo observó Wynn en nuestra segunda expedición. Todos



2. CORTE LATERAL de un impacto de meteorito, reconstruido por medio de simulaciones de ordenador. Nos muestra que los cráteres de Wabar se generaron en segundos. El meteorito se acható en el momento de la colisión; una onda de choque lo atravesó haciendo que saltaran del mismo pedazos, sin que sufriese mucho daño. Lo que quedó se derritió y fundió con la arena subyacente; la que lo rodeaba, comprimida, formó la impactita. Todo ello fue entonces lanzado al aire. Las capas más profundas de arena no experimentaron especial alteración.

están rellenos de arena. En los bordes la arena amontonada se aguanta gracias a la impactita —una piedra basta, blanqueada, de arenisca— y a grandes cantidades de escoria de vidrio negro y pellas. El paso de los vehículos destruye los bordes de los cráteres. También se observan, de vez en cuando, fragmentos de hierro y níquel.

Los geólogos saben que un cráter se originó por impacto de meteorito —y no por erosión o por actividad volcánica— si observan señales del paso de ondas de choque por las rocas. Las rocas de impactita de Wabar han superado la prueba. Presentan láminas bastas, como otras areniscas, pero en su caso consistían en arena compactada en la que había, dispersos, huecos con forma de cinta. A veces las capas se doblan y retuercen al unísono, a diferencia de lo que vemos en otras areniscas. Estas laminaciones son seguramente perpendiculares al camino que siguió la onda de choque. Además, la impactita contiene coesita, una suerte de cuarzo generado por las ondas de choque que sólo se encuentra en lugares donde se hayan producido explosiones nucleares o impactos de meteoritos. Los experimentos de difracción de rayos X muestran que la coesita exhibe una estructura cristalina insólita, que indica que sufrió grandes presiones.

La impactita se concentra en los bordes del sudeste y apenas se insinúa en los bordes septentrionales y occidentales. Esta asimetría sugiere que el impacto fue oblicuo, que los objetos procedían del noroeste y formaban con la horizontal un ángulo de entre 22 y 45 grados.

Los otros dos tipos de roca que encontramos en Wabar corroboran el impacto. En ningún otro punto del desierto hay fragmentos de níquel y hierro. Se les supone pertenecientes al propio meteorito. Los fragmentos se presentan en dos formas: cuando se encuentran debajo de la arena parecen bolas oxidadas y resquebrajadas de hasta diez centímetros de diámetro que se hacen añicos en la mano. Daniel M. Barringer, ingeniero de minas estadounidense que a principios de este siglo realizó prospecciones en busca de hierro en el cráter del Meteorito en Arizona, llamó "bolas de esquisto" a este tipo de fragmentos, habituales allí donde cayeron meteoritos de hierro.

Cuando aparecen en superficie, los fragmentos de hierro suelen ser lisos y cubiertos por una pátina de barniz negro. La pieza mayor de hierro y níquel recuperada es la "Joroba de Camello", recogida en 1965 y ahora exhibida en la Universidad Rey Saud en Riad. Este pedazo cónico, achatado, de 2200 kilogramos de peso, debió de separarse del meteoroide principal antes del impacto. Como la superficie de un objeto es proporcional al cuadrado de su radio y la masa al cubo, un cuerpo menor sufre, en proporción, una mayor resistencia del aire. Por tanto, una esquirla de un proyectil decelerará más que éste, y es posible que, cuando aterrice, rebote en vez de abrir un boquete.

El otro tipo peculiar de roca que vimos en Wabar fue el vidrio negro. Suele darse roca vítrea donde se produjo un impacto. Su formación se atribuye al material fundido que brota del cráter. Cerca de los bordes de los cráteres de Wabar el vidrio negro recuerda al *pahoehoe* hawaiano, un tipo de roca arrugada, como gelatinosa, que se forma a medida que se va enfriando lava densa. Más allá, las pellas de vidrio, menores, semejan gotas. A una distancia de 850 metros al noroeste del cráter más cercano, las pellas miden escasos milímetros de ancho. Si hay más, allende esa distancia, las dunas las habrán cubierto. El análisis químico del vidrio confirma su contenido uniforme: un 90 por ciento de arena del lugar y un 10 por ciento de hierro y níquel. Estos dos últimos elementos aparecen como glóbulos microscópicos en una matriz de arena fundida. Algunos fragmentos de vidrio son muy delicados. Hemos encontrado filigranas fragilísimas que aconsejan dejarlas *in situ*.

La distribución del vidrio en la zona indica que el viento soplaba desde el sudeste en el momento del impacto. En el norte de Rub'al-Khali la dirección del viento posee carácter estacional. Sopla del norte diez meses al año; esculpe entonces las inmensas dunas barcanas, falciformes. Pero al principio de la primavera cambia y sopla desde el sudeste. La primavera es la estación de las tormentas de arena. Coincide con la estación de los monzones del mar de Arabia. Durante todo el año, el aire está en la más absoluta calma en el orto solar para levantarse al atardecer. Llegado el ocaso, sopla con tal fuerza que la arena azota el rostro; en nuestras expediciones teníamos que ponernos gafas de natación para ver y poder montar las tiendas de campaña. Alrededor de la medianoche cesa el viento.



3. EL SEGUNDO CRATER en tamaño del yacimiento de Wabar, el Philby A, aparece semienterrado por una duna deslizante de tipo seif (espada, en árabe). Sólo el lado sudeste del borde, protegido por una gravilla, una mezcla de rocas formada durante el impacto, sobresale todavía por encima de la arena. El cráter, de 64 metros de diámetro, marca dónde se estrelló un meteorito de cinco metros, uno de los varios fragmentos del meteoroide original de Wabar (que se partió en el aire). Los pedazos chocaron contra el suelo a velocidades de hasta 25.000 kilómetros por hora.

Materiales blancos o negros. Wabar ofrece poco más. La dicotomía sugiere que un proceso muy uniforme creó las rocas. Parece que el impacto sólo afectó a la arena; no hay indicios de que penetrase hasta la roca madre. Ni observamos indicio alguno de que ésta emergiera en superficie en 30 kilómetros a la redonda.

De los descubrimientos de nuestras expediciones, sumados a los modelos de impacto elaborados por H. Jay Melosh y Elisabetta Pierazzo, de la Universidad de Arizona, hemos deducido que en Wabar se produjo la siguiente cadena de sucesos. El objeto llegó desde el noroeste formando un ángulo pequeño con el horizonte. Sería a última hora de la tarde o a poco de caer la noche de principios de primavera. Igual que la mayoría de los meteoritos, atravesó la atmósfera a una velocidad de entre 11 y 17 kilómetros por segundo (entre 39.600 y 61.200 kilómetros por hora). Por seguir una trayectoria oblicua, tardó más en atravesar la atmósfera que si hubiese caído perpendicularmente; por tanto, la resistencia del aire tuvo un efecto mucho mayor. Esta fuerza de resistencia aumenta a medida que el proyectil desciende por un medio cada vez más denso. Para la mayoría de los meteoroides, esa resistencia vence la fuerza de la roca a una altitud de 8 a 12 kilómetros; el objeto explota antes de llegar al suelo. El que se estrelló en Wabar, hecho de hierro, tardó más en reventar. No obstante, al final se dividió en cuatro fragmentos al menos; su velocidad se quedó en menos de la mitad. Los cálculos indican que tocó tierra a una velocidad de entre cinco y siete kilómetros por segundo, unas 25 veces mayor que la de una bala de pistola del calibre 45.

Nos apoyamos en modelos teóricos, experimentos de balística y observación de las explosiones nucleares para extraer la relación general entre magnitud del meteorito, tamaño del cráter y velocidad de impacto. Por norma, los cráteres abiertos en superficies rocosas son 20 veces mayores que el objeto que los formó; en la arena, que absorbe mejor la energía de impacto, el factor se aproxima a 12. Por tanto, el mayor de los objetos que se estrelló en Wabar tenía entre 8,0 y 9,5 metros de diámetro, suponiendo que la velocidad de impacto fuese de siete o de cinco kilómetros por segundo, respectivamente. La masa total del meteoroide original fue de al menos 3100 toneladas. Su energía cinética original venía a ser equivalente a una explosión de 100 kilotones de TNT. Tras el frenado del aire, el fragmento mayor chocaría con una energía de entre nueve y trece kilotones. Aunque la bomba de Hiroshima liberó una cantidad de energía semejante, la zona devastada fue mucho mayor, porque no estalló en el suelo, sino en el aire.

Del punto del impacto brotó una cortina cónica de fluido caliente, mezcla de la argamasa del material del proyectil y arena del lugar. Este fluido se convirtió en vidrio negro. La cortina incandescente de roca derretida se expandió a medida que caían más partes del meteorito. El proyectil se comprimió y acható en esos primeros milisegundos. Una onda de choque lo recorrió en sentido inverso; cuando llegó al final saltaron esquirlas —se astilló, según la jerga geológica— a velocidades moderadas. La cortina absorbió algunas, pero la mayoría fue escapándose para caer en la arena incluso a unos 200 metros de distancia. Son restos del meteorito original. (El astillado puede también arrojar fragmentos de la superficie del planeta sin someterlos a una presión y temperatura intensas. Los famosos meteoritos de Marte, por ejemplo, conservan sus delicadas microestructuras pese a haber sido lanzados violentamente al espacio.)

También se propagó en sentido descendente una onda de choque, que calentó y mezcló la arena circundante. La razón de hierro a arena en las pellas de vidrio sugiere que el volumen de “arena derretida” decuplicó el tamaño del meteorito, es decir, que se fundió una semiesfera de arena de unos 27 metros de diámetro. Más allá de este volumen, la onda de choque, debilitada por el camino recorrido, no logró derretir la arena: simplemente la compactó en impactita.

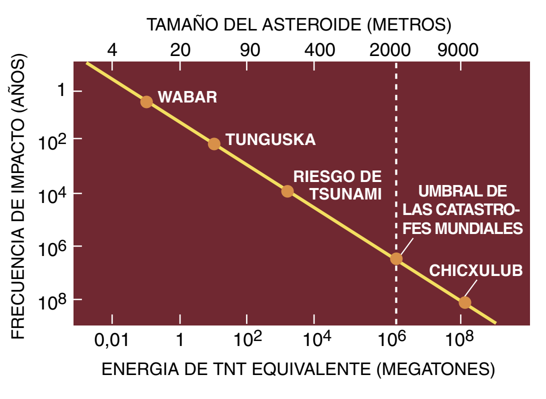
A continuación, la onda de choque provocó una erupción de superficie. Parte de la impactita, arrojada al interior del vidrio derretido, sufrió allí un nuevo efecto de choque. En las muestras de roca esta mezcla constituye una espesa pintura negra rociada sobre la impactita. Otros pedazos de impactita quedaron sumergidos en vidrio a temperaturas de entre 10.000 y 20.000 grados. Cuando ocurría esto, la arenisca sufría una segunda transición y se convertía en vidrio efervescente.

El cráter mayor tardó poco más de dos segundos en abrirse; el menor, cuatro quintos. Al principio esos accidentes adquirieron una morfología provisional, mayor que la actual, pero en pocos minutos la materia volvió



4. MANTO DE MATERIAL ARROJADO en el borde del cráter Philby A. Consta de tres tipos de residuos del impacto: impactita blanca (arenisca formada a partir de la arena comprimida), vidrio negro (una roca parecida a la lava, hecha de arena fundida) y fragmentos de meteorito (hierro casi puro, con algo de níquel). Los autores, enfundados en trajes especiales que los protegían del durísimo clima, buscan con magnetómetros fragmentos del meteorito. La antena del vehículo *Hummer* blanco es para el Sistema Global de Posicionamiento, el GPS, imprescindible en medio del desierto, donde es fácil perderse en un paisaje tan mudable.

a caer del cielo, se desplomó por los lados de los cráteres y redujo su volumen. El cráter transitorio mayor tendría unos 120 metros de diámetro. Toda la arena que había allí antes del impacto engendró una nube con forma de seta que ascendió miles de metros, alcanzando quizá la estratosfera. No se necesitó que el aire del anochecer soplara con fuerza para portar vidrio derretido hasta 850 metros de distancia.



5. FRECUENCIA MEDIA DE LOS IMPACTOS en la Tierra, calculable a partir de la cantidad de residuos que vagan por el sistema solar y la distribución observada de cráteres en la Luna. Una roca de dos kilómetros, capaz provocar la devastación en todo el mundo, sólo se precipita sobre la Tierra una vez cada 500.000 años, de media. (Al relacionar tamaño con energía explosiva en este gráfico, se considera un asteroide rocoso que viaja a 20 kilómetros por segundo.)

¿Cuándo aconteció todo ello? He aquí una de las cuestiones nodales de Wabar. La primera datación, operada a principios de los setenta, remontaba el episodio a unos 6400 años atrás. La fecha se basó en el análisis de las trazas de productos de fisión que se realizó con muestras de vidrio en el Museo Británico y el Instituto Smithsoniano. Las pruebas de campo, sin embargo, apuntan a un momento posterior. El cráter de mayor tamaño estaba a una profundidad de 12 metros en 1932, a ocho en 1961 y para 1982 ya estaba casi completamente cubierto de arena. El borde sudeste sólo tenía tres metros de altura cuando nuestras visitas de 1994 y 1995. Los especialistas en la geología de los médanos creen que un cráter, una vez se ha colmatado, no puede vaciarse.

Wabar habría ya desaparecido de no ser porque el vidrio y la impactita fijan la arena. Al menos dos de los cráteres tienen una capa inferior de roca de impactita; es la cuenca original, anterior al relleno de arena. Pudimos recoger muestras de arena bajo esta capa para su datación termoluminiscente. Los resultados, obtenidos por John Prescott y Gillian Robertson, de la Universidad de Adelaida, sugieren que el suceso ocurrió hace menos de 450 años.

Hay un indicio más cautivador de que podría ser incluso más reciente. Nos referimos a los meteoritos de Nejd, recogidos después de que una bola de fuego sobrevolara Riad en 1863 o en 1891, según qué testimonios se crea uno. Se decía que la bola de fuego se dirigió hacia Wabar; la composición de los meteoritos de Nejd es idéntica a la de las muestras tomadas allí. Cabe, pues, que el cataclismo de Wabar ocurriera hace sólo 135 años. Quizá los abuelos de los guías de Philby vieron la explosión en la lejanía.

La fecha encierra algo más que un mero interés anecdótico. Nos da una idea de la frecuencia con que suceden estos fenómenos. Cuanto mayores son los meteoritos, menos probable es que caigan. De acuerdo con cálculos recientes, objetos del tamaño del que chocó en Wabar se estrellan contra la Tierra uno cada diez años.

Existen cráteres similares, producidos por meteoritos de hierro, en Odessa (Texas), Henbury (Australia) y Sikhote-Alin (Siberia). Y en muchos sitios más. Sin embargo, el 98 por ciento de los sucesos de la magnitud del de Wabar no dejan ningún cráter de recuerdo, ni siquiera provisional. Los causan meteoroides de piedra, que, carentes de la consistencia estructural del metal, se despedazan en la atmósfera. Por una parte, la desintegración tiene la feliz consecuencia de librar al suelo de las colisiones directas. En la Tierra escasean los cráteres de menos de cinco kilómetros de diámetro; parece que los asteroides rocosos de menos de 100 o 200 metros no llegan a superar la atmósfera. Mas, por otro lado, semejante protección no es tan benigna como pudiera parecer. Cuando los objetos explotan en el aire, esparcen sus efectos devastadores por una superficie mayor. Se cree que la explosión de Tunguska, ocurrida en 1908, fue causada por un meteoroide rocoso. Aunque apenas si se encontró rastro del agente en el suelo siberiano, el estallido aéreo abatió 2200 kilómetros cuadrados de bosque, incendiándolo en buena medida. Es sólo cuestión de tiempo antes de que una explosión procedente del espacio, comparable a la de Hiroshima, aniquile una ciudad.

Comparados con otros impactos, Wabar y Tunguska son leves arañazos. Las zonas que han sufrido el golpe, como la estructura anular canadiense de Manicouagan o el enclave mexicano de Chicxulub, son mucho más extensas. Pero esos apocalipsis sólo suceden, en promedio, cada cien millones de años. El asteroide de 10 kilómetros que vació Chicxulub y acabó con los dinosaurios chocó contra la Tierra hace 65 millones de años, y aunque ya hay al menos dos objetos de dimensiones comparables (1627 Ivar y 1998 QS52, descubierto hace poco) en órbitas que cruzan la terrestre, por el momento no se pronostica que vaya a producirse una colisión. Los meteoroides del tamaño del de Wabar son más habituales —y más difíciles de acotar por los astrónomos— que los grandes monstruos. Hasta que no se realizaron las expediciones de Wabar, apenas sabíamos algo de sucesos tan comunes. La escoria y las rocas con efectos de choque que hemos contemplado en los desiertos de Arabia nos han demostrado, con una gran riqueza de detalles, lo que pueden desencadenar seres tan menudos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AN ACCOUNT OF EXPLORATION IN THE GREAT SOUTH DESERT OF ARABIA. Harry St. John B. Philby en *Geographical Journal*, vol. 81, n.º 1, págs. 1-26, enero de 1933.

IMPACT CRATERING: A GEOLOGIC PROCESS. H. J. Melosh, Oxford University Press, 1989.

“SECRET” IMPACTS REVEALED. J. Kelly Beatty en *Sky & Telescope*, vol. 87, pág. 26-27, febrero de 1994.

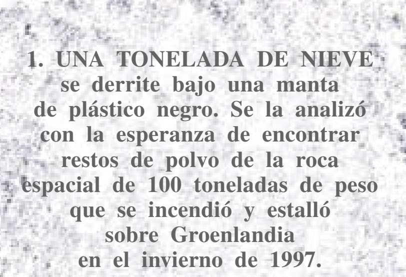
HAZARDS DUE TO COMETS AND ASTEROIDS. Dirigido por Tom Gehrels. Arizona University Press, 1995.

RAIN OF IRON AND ICE: THE VERY REAL THREAT OF COMET AND ASTEROID BOMBARDMENT. John S. Lewis, Addison-Wesley Publishing, 1996.

Para más información sobre las estructuras de impacto, consultar la siguiente dirección: http://bang.lanl.gov/solarsys/eng/tercrate.htm, en la WWW.

Meteoritos en hielos

Una cámara registró la bola de fuego que atravesó los cielos del Artico en diciembre de 1997, el misterioso meteorito de Groenlandia. Demasiado rápido quizá para tratarse de un objeto de nuestro sistema solar



1. UNA TONELADA DE NIEVE se derrite bajo una manta de plástico negro. Se la analizó con la esperanza de encontrar restos de polvo de la roca espacial de 100 toneladas de peso que se incendió y estalló sobre Groenlandia en el invierno de 1997.

polares

W. Wayt Gibbs



La asombrosa noticia nos llegó por teléfono, vía satélite, a las ocho de la tarde, recuerda el astrónomo Lars Lindberg Christensen. Acababa de cenar con los otros cuatro daneses y dos groenlandeses que participaban en la expedición, y ahora descansaba con ellos en la tienda de campaña, una tienda redonda, de las de cúpula, que los alojaba a todos. Mataban el tiempo, el tiempo que se les iba. Hacía siete días que la busca de los restos del meteorito de Kangilia estaba interrumpida, que al otro lado del teléfono unas voces hacían variaciones sobre un desquiciador mensaje: "Seguid a la espera... El helicóptero no puede despegar de Kangerlussuaq por la niebla... Está muerto de risa en Paamiut... Tuvo que volver a Nuuk porque estaba encapotado .... Esperad sólo unas horas más..." . Mientras tanto, el campamento, levantado sobre una nieve que no tendría que estar ya sobre el suelo helado a esas alturas del corto verano de Groenlandia, se iba volviendo un gélido fangal. Hacía tiempo que tenían que haberse trasladado a la cima rocosa y seca de un nunatak y proseguir la caza.

De pronto la voz del teléfono daba buenas, increíbles noticias. Según una emisora de televisión de Nuuk, un guarda de caza había encontrado el meteorito. Mientras navegaba por el laberinto fractal de calas e islas que hay cerca de Qeqertarsuatsiaat, a unos 60 kilómetros al oeste del campamento, había divisado cuatro cráteres en las estribaciones de las montañas costeras. Dentro había rocas renegridas. "Fue un momento intenso", contó Christensen a la mañana siguiente. "Todos estábamos pletóricos. Debimos de gastar al menos una hora de satélite para encontrar al individuo y que nos guiara al lugar." Y llegaron más buenas nuevas: el mal tiempo que había paralizado al equipo se estaba despejando por fin. El helicóptero les recogería poco después del amanecer y les llevaría a inspeccionar los cráteres.

Esa noche Christensen daba vueltas en la cama, sin poder dormir sólo de pensar en lo que les esperaba. No le irritaba, decía, que pudieran haberse pasado un par de semanas recorriendo a pie kilómetros de hielo, subiendo y bajando barrancos, derritiendo hielo para examinar el polvo, buscando de todas las maneras posibles pero en lugares completamente equivocados. "Que alguien, nosotros o quien sea, encuentre algo, es lo único que importa. Los cálculos, las personas pueden equivocarse."

Se refería a Holger Pedersen y Torben Risbo, un astrónomo y un geofísico del Instituto Niels Bohr de Astronomía, Física y Geofísica de Copenhague, los cerebros tras el músculo juvenil de la expedición. Risbo y Pedersen seleccionaron la zona de búsqueda, un área de cientos de kilómetros cuadrados cerca de la raíz del Frederikshåbs Isblink, el gigantesco y lento puño de hielo glacial que tiene, donde se estableció el campamento, un espesor de 1200 metros. Y fueron Pedersen y Risbo quienes, tras ocho meses de investigación detectivesca, casi se habían convencido a sí mismos, y convencido a otros científicos, de que el meteorito ardiente que había iluminado la costa sudoeste de Groenlandia el 9 de diciembre de 1997 tenía un origen extraordinario. No sólo extraterrestre, sino extrasolar. Interestelar. El primer embajador conocido procedente de un sistema estelar que no es el nuestro, quizás a cientos de años luz de distancia.

Esa posibilidad tuvo mucho peso para Christensen, de sólo 27 años de edad. Sabía que, si lograba traerse el meteorito —o aunque fuera un pedazo del tamaño de un guisante—, los geoquímicos podrían probar la veracidad de esa hipótesis poco ortodoxa. O, lo más probable, demostrar que era falsa.

No es que Pedersen sea el tipo de investigador que propone irresponsablemente una teoría inverosímil para llamar la atención. Es sólo que, como este científico de 51 años me explicó con mucha seriedad en su soleado y espartano despacho de Copenhague, "nadie podía esperarse que el primer meteoroide interestelar que se detectase tuviera ese tamaño". Los cálculos le dan una masa de 100 toneladas antes de que empezara a quemarse en la atmósfera. "Uno esperaría ir encontrando muchos meteoroides interestelares pequeños

El meteorito de Kangilia



El meteorito entró en la atmósfera sobre el Atlántico Norte en la madrugada del 9 de diciembre de 1997. Mientras se precipitaba en dirección este sobre la costa sudoeste de Groenlandia, a 56 kilómetros por segundo quizá, la presión de entrada aumentó vertiginosamente (*abajo*, tal y como se vería desde un punto sobre la costa este de la isla). A una altitud de más de 24.000 metros, la bola de fuego explotó en cuatro pedazos. "Todo se iluminó como si fuera de día", recordaba un marino de un barco de pesca que estaba frente a la costa, cerca de Qeqertarsuatsiaat (*abajo a la derecha*).

En Copenhague, los expertos triangularon las líneas de visión de los testigos de allá y de Paamiut, otro pueblo de pescadores, con la trayectoria registrada por una cámara de vídeo en Nuuk, la capital de la isla (*primera de la derecha, en dorado*). Concluyeron que si algún fragmento resistió el paso por la atmósfera, tuvo que tomar tierra en una densa nieve cerca de la base de Frederikshåbs Isblink. A finales de julio, fundida la nieve y dejada al descubierto la capa de hielo, una expedición de siete hombres pasó un mes en dos campamentos sobre el hielo, en busca de los restos del meteorito en una zona de más de tres mil kilómetros cuadrados (*a la derecha del todo*).

antes de hallar uno tan grande", me explicó, escogiendo con tal cuidado las palabras que hasta la entonación quería ser precisa. Pero no se ha confirmado el hallazgo ni de uno solo. "Por eso entendemos perfectamente el lógico escepticismo ante esta hipótesis."

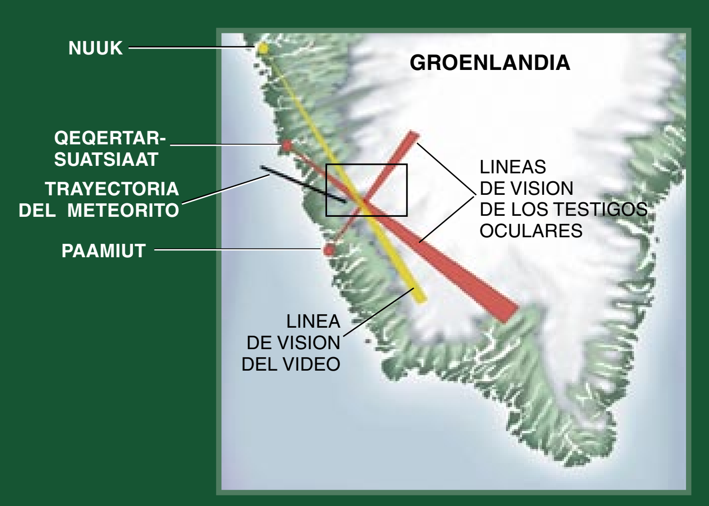
Pedersen parecía consciente del peligro en que ponía su carrera de investigador por derroteros alejados de su disciplina, las explosiones de rayos gamma en las galaxias lejanas. Zdenek Ceplecha, experto checo en órbitas de meteoritos, escribió, desde un congreso de especialistas, que "si les hubiera dicho (y no lo he hecho) que el meteorito de Groenlandia tenía una órbita tan hiperbólica" —es decir, una órbita que no puede circundar el Sol—, "se habrían tronchado de risa".

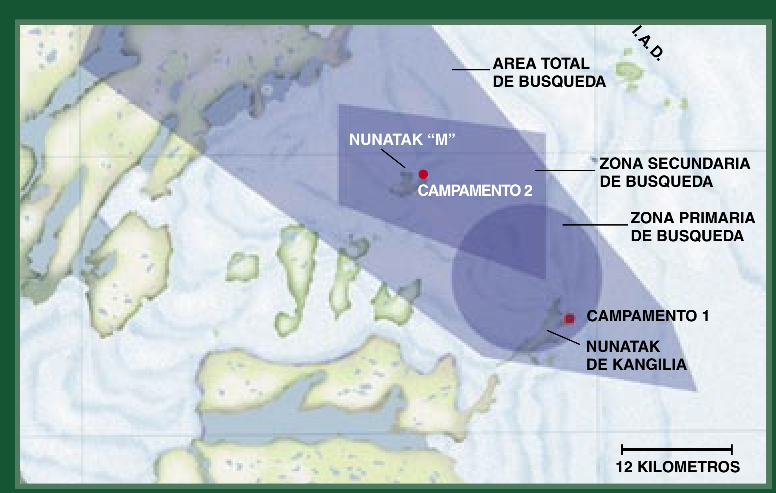
Pese a todo, Pedersen y Risbo habían decidido asumir el riesgo del ridículo. Se vieron forzados a ello ante las pruebas desplegadas por Pedersen sobre la mesa. Había una tira alargada con un gráfico de la intensidad de la luz a lo largo del tiempo, varias hojas con gráficas de los datos tomados por los satélites americanos de defensa contra misiles, un cuadernillo repleto de figuras garabateadas, breves frases en danés y diagramas apresurados. Y en su pantalla, el vídeo de Heilmann.

Kristian Heilmann había montado una cámara en su casa de Nuuk para vigilar de noche la moto de nieve. Un golpe de buena suerte hizo que grabase tres segundos de la caída libre de la estrella fugaz y, ni un segundo más tarde, un último resplandor justo bajo el horizonte.

"Este vídeo vale cien veces más que un testigo ocular", reconoció Pedersen. Las cámaras tienen un sentido fiable del tiempo. En cambio, la mayoría de los observadores cuentan lo que cabe imaginarse después de la conmoción de abrir los ojos como platos a las cinco y cuarto de la mañana y ver en el aire una explosión con la energía de 64 toneladas de TNT. Para unos, se trataba de colosales bolas de fuego del tamaño de la Luna y con el brillo del Sol. Otros recuerdan estelas de llamas, anchas como un par de manos extendidas. "¡*Sunaana*!", gritó un niño de tres años a su abuela en Paamiut. "¿Qué era eso?"

Una pregunta científica bastante razonable. A Pedersen se le antojó que podría responderla; antes, empero, necesitaba resolver dos problemas más











2. HIELO TRAICIONERO en la zona rastreada; tiene grietas de hasta 30 metros de ancho y 100 metros de profundidad. Pese a lo peligroso del terreno, el equipo recorrió unos 200 kilómetros a pie. La mayor parte de la zona, sin embargo, fue observada desde el aire.

sencillos: ¿en qué dirección viajaba y a qué velocidad? Si determinaba la trayectoria de la bola de fuego por el campo de visión de la cámara, entonces podría inferir su velocidad.

"Por el vídeo pudimos determinar, con mucha precisión, que el meteorito se movía en un plano que se inclina así, unos 47 grados con respecto al horizonte", afirmó Pedersen agitando con pasión un lápiz y sosteniendo hojas de papel por el borde para que se viese la triangulación de la trayectoria del meteorito. "Pero no sabíamos cómo se desplazaba en ese plano."

Durante dos oscuras semanas de enero, llevó a cuestas un teodolito, un instrumento topográfico, de un pueblo de Groenlandia a otro. Habló con unos treinta testigos oculares y llenó su cuaderno con dibujos, testimonios y, lo más importante, medidas precisas de los ángulos en los que cada observador recordaba haber visto la bola de fuego, tomadas en los puntos exactos donde la percibieron.

Mientras tanto, por los pasillos académicos corrió enseguida la voz de que existía ese vídeo. Ceplecha, interesado, ofreció su experiencia y sus medios. "Introdujimos todas las restricciones en su programa de mínimos cuadrados y generamos la trayectoria más probable", expuso Pedersen. Pero esos mismos cálculos daban también una velocidad improbable: 56 kilómetros por segundo, más de dos veces superior a la de entrada en la alta atmósfera de casi todos los meteoritos; era especialmente increíble porque la colisión no fue frontal. Se había precipitado

sobre la Tierra a 200.000 kilómetros por hora.

Remontando la trayectoria, Ceplecha descubrió, para su desánimo, que la órbita no se acerca nunca al cinturón de asteroides, de donde procede la mayoría de los meteoritos; más aún, estaba totalmente fuera de la eclíptica, así que hasta un extraño tiro de honda alrededor de Marte quedaba descartado. Si las observaciones y sus cálculos eran correctos —de lo que Ceplecha dudaba muy mucho—, entonces, fuera lo que fuera lo que se incendió en el cielo de Groenlandia, tenía que provenir del espacio profundo, allende incluso la nube de Oort, de donde proceden los cometas y se encuentra en la frontera del pozo gravitatorio del Sol.

De pronto, la expedición que el Planetario Tycho Brahe de Copenhague estaba preparando para hallar el meteorito adquirió una importancia redoblada. Si Risbo y Pedersen estaban en lo cierto, no se encontraría más que polvo esparcido en la nieve. Las colosales presiones de la entrada en la atmósfera terrestre no habrían dejado sino los fragmentos más diminutos. "Creo que el destino final de este meteorito era devenir lluvia de materia evaporada y granos submilimétricos", dijo Risbo. Algunos granos, enterrados todavía bajo un metro de *pukak* —nieve que lleva un año sobre la superficie—, podrían encerrar las pruebas de su origen extrasolar.

Por otra parte, si los cazadores regresaban a casa con una roca espacial, especialmente una que encajase en las categorías conocidas de meteoritos, la hipótesis interestelar abortaría. Sólo la existencia de pruebas tangibles zanjaría la cuestión.

Así que los científicos sacaron su mapa del tesoro y lo extendieron en el regazo de Risbo. Un gran círculo alrededor del nunatak de Kangilia ceñía la zona principal de la busca. Tras una semana de rastreo, la expedición no encontró nada. Pero ahora que por fin disponían de un helicóptero, se habían trasladado al área secundaria, tan remota que el montón de rocas que hay cerca de su centro ni siquiera tenía nombre oficial. Pedersen lo llamó "nunatak M". M de meteorito.

Al llegar al nunatak "M" me encontré a un Christensen con dos caras. Acababa de volver del lugar donde se había dicho que estaban los cráteres de impacto. "En cuanto los vi", dijo, "me di cuenta de que no eran cráteres en absoluto". "La pendiente se había erosionado y habían caído algunas rocas dentro de las grietas. Todos estábamos un poco decepcionados." Pero también vi en su rostro una expresión de alivio mientras contemplaba el helicóptero que se dirigía hacia nosotros. Al fin tenía un medio de transporte. Desde el aire les sería posible escudriñar mayores extensiones de hielo en una hora que lo que habían podido cubrir a pie en dos semanas.

A la mañana siguiente, René Sørensen y Tore Jørgensen colocaron los trineos en el helicóptero y partieron para establecer un campamento remoto, donde durante los tres días posteriores recogerían una tonelada de nieve. Con los binoculares les seguí en su despliegue del plástico negro sobre el que echaban paletadas de *pukak*. A continuación filtraban el agua derretida, casi pura, en busca de cualquier traza de elemento sólido que hubiera podido quedar atrapada en la nieve desde que empezó a acumularse en agosto.

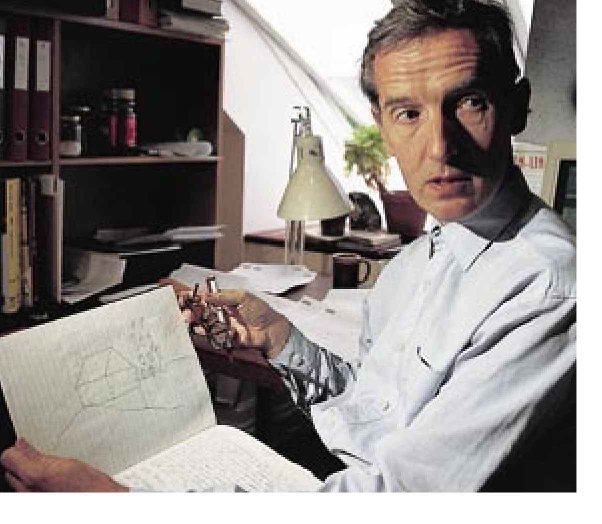
"La primera semana intentamos examinar las partículas con el microscopio, por si descubríamos algo prometedor", dijo Christensen. "Como la tormenta no cesaba, trabajamos dentro de la tienda. Pero en cuanto abríamos las muestras se contaminaban", con carbonilla de los quemadores de queroseno, pelo de las pieles de reno y cabello humano. Desde entonces se han sellado todas las muestras para su posterior análisis en Copenhague.

Completar este estudio llevará meses. Aunque reviste mayor entidad científica que el trabajo de campo realizado en Groenlandia, no será ni la mitad de emocionante. Me quedé





3. DENTRO DE UNA GRIETA, el hielo liso no ofrece dónde sujetarse. Cuando la nieve cubre las bocas de las grietas pueden producirse caídas mortales. "Caminamos en fila india, atados con cuerdas, de modo que si uno cae los demás le pueden sacar", explicó Jensen.





4. EL ASTRONOMO Holger Pedersen fue de casa en casa recogiendo testimonios de groenlandeses que observaron el fenómeno. Al establecer una correlación entre sus notas (*izquierda*), el vídeo grabado en Nuuk (*derecha*) y los datos de los satélites del Mando Espacial de los Estados Unidos, llegó a la extraordinaria conclusión de que se trataba del primer meteorito procedente del espacio interestelar observado.

boquiabierto ante el panorama cuando miré más allá de los que cavaban a lo lejos. Allende los nunataks de I.A.D. Jensens, se divisan cinco enormes montañas sumergidas, como una manada de ballenas en un océano blanco, donde sobresalen sólo las aletas dorsales grises que recortan la superficie. Más allá aún, a una distancia de 90 kilómetros quizá, se perfila el horizonte definido por la curvatura del planeta.

Junto a mí estaba Claus Kongsgaard Jensen, piloto de las Fuerzas Aéreas danesas. Como todos los miembros del equipo, era voluntario sin remuneración. Siguió mi mirada hacia el nordeste con sus ojos verdes, el de los fiordos de los glaciares próximos a Paamiut. “Puedes ir en esa dirección durante unos 1000 kilómetros sin encontrarte otra cosa que hielo”, me explicó. Más allá de los nunatak de I.A.D. Jensens el hielo tiene un espesor de 3300 metros y se traga las montañas.

Para las 9 de la mañana los hombres habían consumido su segundo desayuno. Seis de ellos entraron en el helicóptero. Comenzaba la caza por aire. El avión despegó rumbo sudeste, hacia el lugar donde Ceplecha, Risbo y Pedersen calcularon que se había producido la colisión de los fragmentos mayores, si es que alguno llegó al suelo. El plan consistía en cubrir cientos de kilómetros cuadrados en unas dos horas; el rastreo se efectuaba siguiendo un retículo: diez kilómetros hacia delante, uno a la derecha, diez hacia atrás, uno a la izquierda, una y otra vez.

Desde una altitud de 30 metros seis ojos escudriñaban una franja de hielo de 900 metros a la izquierda del helicóptero. Otros seis lo hacían a la derecha. Incluso a cincuenta nudos, decía Christensen, “si hay algo y no está enterrado bajo la nieve, estoy bien seguro de que lo veremos”.

Cuando los perdí de vista, me senté en el nunatak “M”, un amasijo de granito oscuro, mineral de hierro oxidado y cuarzo blanco cristalino hecho trozos por el frío agrietador, la acción del hielo y tres mil millones de años de existencia. De pronto parecía como si todo se hubiera detenido, como si alguien hubiese apagado el interruptor del tiempo.

Tras el ruido ensordecedor de las enormes hélices del Bell 212, aquel silencio absoluto infundía cierto miedo. Faltaban tantos sonidos: el tráfico, los aviones, el trasiego de las personas, pájaros, insectos, el viento... Ser sordo debe ser así, pensé.

Oí el helicóptero antes de poder divisarlo, a unos 20 kilómetros por lo menos. Christensen bajó portando una bolsa llena de arena fangosa, negra como la obsidiana. “No hemos encontrado nada”, dijo decepcionado. Alzó la bolsa. “Vi esto en la superficie de una charca de agua fundida. Pero sólo es una crioconita.” Los remolinos y charcos de los arroyos de agua de fusión que corren a través de la cubierta de nieve y bajo ella recogen el polvo y las algas arrastradas por las corrientes. Con el paso del tiempo, explicó, los depósitos negruzcos se transforman en crioconitas y llegan a tener un metro de ancho.



5. UNA BUSQUEDA INUTIL llevó al equipo a abandonar el hielo para investigar unos supuestos cráteres de impacto divisados en la costa. Pero los yacimientos (*las manchas blancas en la imagen superior*) resultaron ser una consecuencia natural de la erosión. Esta pista falsa, la semana de paralización de las actividades por culpa del mal tiempo y el rastreo estéril desde el aire mellaron la moral del astrónomo Lars Lindberg Christensen (*derecha*).



“Aquí podría haber polvo del meteorito”, dijo. Sin embargo, esta posibilidad no parecía levantarle la moral. Durante la cena de la noche anterior pregunté a Christensen qué esperaba encontrar. “Soy totalmente objetivo”, manifestó. “No espero nada.”

Sin embargo, para tratarse de un hombre que no esperaba nada su semblante reflejaba decepción. “Es extenuante. Hemos puesto todo nuestro saber y atención”, se excusó, un poco a la defensiva, como si su jefe le estuviera escuchando desde el planetario.

Esa tarde, el equipo volvió a buscar durante 90 minutos. Regresaron con las manos vacías. En el tercer y último viaje del día, Jensen pidió al piloto que descendiera en dos ocasiones. Pero cada vez las esperanzas de encontrar una roca se disolvieron en negros montones de crioconita.

Al terminar el día, Christensen estaba dispuesto a admitir que al fin y al cabo era un ser humano, con opinión propia. “Esta expedición es de las de o blanco o negro”, dijo. “O encontramos el meteorito o no. Ahora mismo, sólo veo negro.”

Al día siguiente, en el Laboratorio Nacional Sandia, en Nuevo México, Ceplecha se reunió con Richard E. Spalding, especialista en detección a distancia. Intentaban que el vídeo de Heilmann casara con los datos recogidos por los dos satélites del Mando Espacial de los Estados Unidos que también registraron la fragmentación explosiva del meteorito.

Pedersen había defendido que el vídeo no distorsionaba el tiempo; en Sandia llegaron a la misma conclusión. “Los dos destellos que vemos en el vídeo guardan una manifiesta correlación, sin que quepa confusión alguna, con dos picos muy brillantes en los datos de los satélites”, opinaba Spalding.

Llamó éste a Edward Tagliaferri, asesor del Pentágono en análisis de observaciones de satélite secretas. “Mi interpretación de los datos del satélite es que los destellos indican una velocidad de 46 a 52 kilómetros por segundo”, dijo Tagliaferri. “No puede ser la mitad de esa cifra, pero es posible que me equivoque en un poco.” Sugirió que quizá dos pedazos grandes, distantes varios kilómetros entre sí, explotaron en unos pocos milisegundos.



6. LA INMENSIDAD de la extensión de hielo hace poco probable el descubrimiento del meteorito. “Teníamos que ir a mirar de todas maneras”, dijo Christensen; “no había escapatoria”.

Spalding apuntaba otra posibilidad, no menos conjetural. ¿Qué habría pasado si la cola ionizada del meteorito hubiera conectado dos capas cargadas de la atmósfera, como un cable? “Se habría producido un plasma de iones acelerados que se lanzarían hacia abajo, adelantarían al objeto y seguirían avanzando sin obstáculo hasta descargar toda su energía de golpe en un destello gigantesco. Como un rayo, pero de iones.”

Las cámaras de vídeo y del satélite quizá captasen la imagen de un rayo de plasma avanzando rápidamente y dejando atrás al meteorito, más lento (y común), apuntaba Spalding. Es una idea heterodoxa, pero Ceplecha manifestó que él, por su parte, se inclinaba más por esta posibilidad que por la hipótesis de los meteoritos interestelares.

Un mes más tarde, a principios de septiembre, Pedersen empezó a sospechar que quizá no hiciese falta ninguna de esas explicaciones, pues a lo mejor habían andado errados en cuanto a la velocidad. Acababa de recibir una nueva copia digital del vídeo. Las imágenes eran mucho más claras que en la anterior, tanto que pudo superponer los cuadros de la cinta con las señales del satélite. Con esta nueva calibración, Pedersen volvió a calcular la trayectoria de la bola de fuegó y llego a una conclusión muy diferente de la inferida por Ceplecha: una velocidad de 29 kilómetros por segundo, y no de 56; por tanto, se originó dentro del sistema solar, no fuera de sus límites.

Aunque este nuevo modelo parecía más razonable, en opinión de Pedersen seguía habiendo una parte confusa. Si la roca se desplazaba a una velocidad normal, tendría que haberse dejado ver en cuanto penetrara en la atmósfera. “Casi todos los meteoritos empiezan a resplandecer entre los 110 y 90 kilómetros de altitud”, señaló. Sin embargo, parecía que esta bola de fuego no se puso incandescente hasta los 70 kilómetros. Esto es muy difícil de explicar.

Ante estas alternativas tan insatisfactorias, muchos expertos podrían perder su interés por el meteorito de Kangilia, excepcional en todo salvo en el tamaño. A no ser que la expedición regresara con pruebas sólidas, materiales, de lo contrario.

El 16 de agosto la expedición llegó a su término como había empezado, frustrada por el caprichoso clima de Groenlandia. Para cuando la niebla hizo aparición forzándoles a abandonar el hielo, los componentes del equipo habían recorrido unos 200 kilómetros por la traicionera capa de hielo con lluvia, viento y nieve. Habían sobrevolado más de mil kilómetros, escudriñando durante 25 días una zona tan grande como Rhode Island en busca de una piedra del tamaño de una pelota de golf.

Quizás hayan recogido algunos reveladores granos de polvo de estrellas en sus muestras de nieve. Pero parece más probable que la verdadera naturaleza del meteorito de Kangilia permanezca vedada a la ciencia. La nieve comenzó a caer sobre el hielo el mismo día que el equipo cejó en su búsqueda. Muy pronto, cualquier fragmento que yaciese en los charcos de agua de deshielo, en lo más profundo de las azules grietas o entre los restos rocosos de las morrenas glaciares quedará enterrado, y Groenlandia sumará un secreto más a los muchos escondidos bajo su superficie.

PERFILES

Carol Ezzell

JUDAH FOLKMAN: Cortar el riesgo a los tumores

A las 9 de la mañana de un viernes de junio, caluroso y húmedo, la sala de reunión del décimo piso del Hospital Infantil de Boston está repleta. Abunda gente joven en camiseta y vaqueros. Sobre una treintena de doctorandos y doctorados, destaca Judah Folkman, por su edad (65 años), la corbata impecable, impoluta la bata. También, por sus modales corteses, aunque imperativos.

En esta reunión semanal, toman la palabra distintos miembros del laboratorio para exponer los resultados que van obteniendo en el estudio de las relaciones entre la angiogénesis (el desarrollo de nuevos vasos sanguíneos) y el cáncer. Folkman pide detalles, plantea observaciones o indica refinamientos metodológicos. Es un magistral director de orquesta. Lo mismo recrimina a un engallado postdoc su frivolidad en las respuestas que le elogia por su "notable progreso".

El laboratorio de Folkman apareció en portada del *New York Times* el mes de mayo del año pasado. Describíanse allí los resultados obtenidos por ellos sobre la curación del cáncer en ratones mediante el uso de inhibidores de la angiogénesis, derivados de forma natural, que impiden que los tumores malignos reciban flujo sanguíneo.

Uno de los aspectos más sensacionalistas del artículo del *Times* era una frase puesta en labios de James D. Watson, gurú como se sabe de la biología molecular: "Judah curará el cáncer de aquí a dos años". Por más que el periódico publicara al poco una carta de rectificación, la mecha se había prendido. A las consultas de los médicos llegó una legión de pacientes con cáncer demandando la aplicación del inminente "tratamiento", pese a que aún no había empezado el ensayo de prueba en humanos.

Folkman no entiende el patinazo irresponsable del *Times*. "Todos nuestros resultados se han obtenido con ratones", subraya. "Son muchas las sustancias que inhiben el cáncer en los ratones, pero ninguna de ellas ha funcionado bien en la gente." Se le advierte muy preocupado por las falsas esperanzas que la lectura del reportaje ha podido infundir en los desahuciados por el cáncer.

Folkman es un reputado cirujano infantil. Pero no trasluce en absoluto el aire altanero que rodea al estereotipo de cirujano de éxito. Todo lo contrario. Odia las entrevistas o que publiquen su fotografía; lo segundo es porque no quiere dar la impresión de que se arroga la cosecha que otros han sembrado. Quiere evitar que se piense que es el director del único laboratorio del mundo consagrado a la angiogénesis; muchos otros se dedican también.



1. La búsqueda de nuevos inhibidores de la angiogénesis es la meta de Judah Folkman (a la derecha) *y sus colegas* (de izquierda a derecha) *Robert J. D'Amato, Michael S. O'Reilly y Donald Ingber. A Folkman no le gusta que publiquen su foto sin otros colegas de su laboratorio*

En su despacho, mínimo y funcional con mobiliario de los años setenta, no cabe ni una separata más. Ni siquiera se sirve de su ordenador, inaccesible y traspapelado entre montones de artículos. Cuando necesita redactar algo se acomoda en uno que hay libre cerca del escritorio de su secretaria.

La carrera de Folkman en cáncer y angiogénesis comenzó en circunstancias un tanto azarosas. La Marina estadounidense le llamó a filas en 1960. Aunque acababa de terminar su residencia en cirugía en el Hospital General de Massachusetts, en Boston, se le destinó a un pequeño laboratorio del Centro Médico Naval Nacional de Bethesda (Maryland), para que colabo-

rara en una tarea que emprendieron los militares, la de crear un sustituto de la sangre para emplearlo en los portaaviones, que con frecuencia pasan meses en alta mar.

Allí llevó a cabo los experimentos cruciales que le centraron en la angiogénesis. Mientras estudiaba la capacidad de un sustituto sanguíneo sin células para mantener viva en cultivo la glándula tiroides de un conejo, Folkman y Frederick Becker, su compañero en la milicia, colocaron unas cuantas células de melanoma de conejo en la superficie de la glándula. Para su sorpresa, las células crecieron pero se detuvieron una vez que formaron tumores del tamaño de un guisante. "¿Por qué dejaron de crecer los tumores? Esa cuestión me mantuvo en vilo durante años".

Tras licenciarse del ejército en 1962, Folkman regresó al Hospital General de Massachusetts, donde en dos años se hizo con la jefatura del servicio. Cuando aún era uno de los cirujanos jóvenes más brillantes de la Facultad de Medicina de Harvard, en 1967 obtuvo la plaza de catedrático y presidente del departamento de cirugía del Hospital Infantil. Folkman se había distinguido como cirujano por su depurada técnica y por su capacidad para formar a otros. También había participado en el desarrollo preliminar de dispositivos implantables de suministro de fármacos.

Siempre mantuvo Folkman un pequeño laboratorio de investigación en paralelo para dar cauce a su interés por la angiogénesis. Pero cuando intentó publicar sus resultados con animales, docenas de revistas lo rechazaron. Muchos expertos se mofaban de la idea de que el bloqueo de la angiogénesis frenara el desarrollo de los tumores.

Sólo tras impartir una conferencia en 1971 consiguió que sus ideas aparecieran por fin en una revista de prestigio. Aquel año le pidieron que impartiera un seminario en el Hospital Beth Israel de Boston, cuyo contenido solía recogerse en el *New England Journal of Medicine*. Folkman dispuso, pues, de un medio de amplia difusión desde el que describir su conclusión de los experimentos con las tiroides de los conejos: que los tumores no pueden sobrepasar un determinado tamaño a no ser que dispongan de un suministro sanguíneo exclusivo y que, si se encuentra una manera de bloquear el proceso de angiogénesis, se podrían cortar de raíz los cánceres incipientes.




2. La desaparición de un tumor implantado en un ratón tuvo lugar tras 12 días de tratamiento diario con endostatina, un inhibidor de la angiogénesis

Pero el artículo en el *NEJM* no hizo más que provocar a los críticos de Folkman. En 1973, cuando afirmó que al inyectar células tumorales humanas en los ojos de los conejos se desencadenaba la angiogénesis, algunos objetaron que el crecimiento observado en los vasos sanguíneos formaba parte de la reacción inflamatoria debida a las células extrañas. Un investigador demostró a continuación que el implante de un irritante químico (un cristal de ácido úrico) en los ojos de los conejos también espoleaba la angiogénesis. A Folkman y sus colegas, tras años de esfuerzo, demostraron que los macrófagos, células del sistema inmunitario, habían entrado en los ojos de los conejos para destruir el ácido úrico y que habían segregado sustancias promotoras de la angiogénesis.

Las penalidades de Folkman por lograr credibilidad se extendieron a todos los factores cruciales para el éxito de un investigador biomédico: capacidad para recabar fondos del Instituto Nacional de la Salud, acceso a las revistas élite y captación de doctorandos para su laboratorio.

"En los años setenta los profesores desaconsejaban a sus mejores alumnos que se vinieran a trabajar conmigo", cuenta con resignación. Durante los años ochenta, Folkman y su grupo siguieron añadiendo piezas al rompecabezas de la angiogénesis y ganando poco a poco partidarios de su tesis: inhibir la angiogénesis podría ser clave para mantener a raya el cáncer. En 1994 tuvo lugar un avance significativo, cuando Michael S. O'Reilly aisló en el laboratorio de Folkman uno de los inhibidores naturales de la angiogénesis más potentes, al que denominaron angiostatina [*véase* "Cáncer y suministro sanguíneo", por Judah Folkman, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1996]. Folkman, O'Reilly y sus colaboradores aislaron un segundo inhibidor natural, la endostatina, en 1996.

Han desaparecido muchas trabas y reticencias. La lista de premios y galardones que Folkman ha recibido ocupa dos páginas enteras de su *curriculum vitae*. Aunque los investigadores todavía no tienen del todo claro cómo actúan exactamente los inhibidores de la angiogénesis, las pruebas de la angiostatina en humanos están en curso.

Cuando se le pregunta cómo es que perseveró a pesar de las críticas despiadadas, Folkman atribuye el mérito a la que es su mujer desde hace 38 años, Paula, una alto que canta en el coro de la sinfónica de Boston. "Yo llegaba desazonado a casa por las noches —dice— y ella me preguntaba: ¿qué importa lo que piensen los demás? Siempre me ha apoyado".

¿Piensa Folkman que va a acabar curando el cáncer? "No, no creo que los inhibidores de la angiogénesis vayan a curar el cáncer", responde. "Pero sí que creo que pueden aumentar la supervivencia y hacer que el cáncer sea más controlable, especialmente en conjunción con la radiación, la quimioterapia y otros tratamientos. Estoy impaciente por ver cómo funcionan en la gente."

—Carol Ezzell

La marihuana

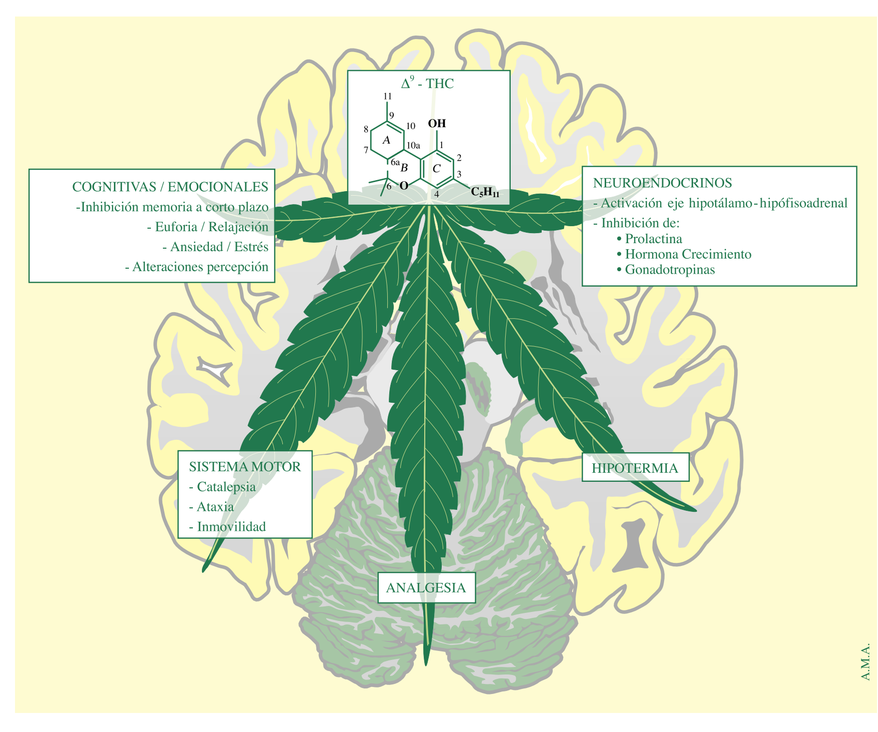
Una droga dura

Los preparados del cáñamo *Cannabis sativa* son las drogas ilegales de mayor uso. Según escritos médicos de China e India, su consumo se remonta cuatro mil años atrás, por lo menos. Su consideración legal como droga adictiva y su antagónica exaltación por determinados sectores de la sociedad ayudan a propagar el aire de droga misteriosa que la envuelve.

Desde el descubrimiento en 1988 de la existencia de receptores cerebrales para los cannabinoides, los principios activos de la marihuana, se han sucedido una serie de hallazgos comparables a los que supusieron la identificación de los receptores para la morfina y la descripción de sus ligandos endógenos, los péptidos opioides.

Conocemos la presencia y distribución de receptores para cannabinoides en el cerebro. Se han encontrado sus ligandos endógenos (anandamida y 2-araquidonil-glicerol), sus enzimas de síntesis y degradación, sus efectores (segundos mensajeros y canales iónicos).

Pero el principal punto de interés social, la adicción a la marihuana, se ha resistido al escrutinio de la investigación. En sendos hallazgos recientes se ha demostrado que la marihuana produce efectos propios de la drogodependencia. Por un lado, el grupo de Gaetano di Chiara, de la Universidad de Cagliari, ha demostrado que el componente psicoactivo de la marihuana (THC) activa el sistema de recompensa cerebral. Las neuronas de este sistema utilizan el neurotransmisor dopamina y ponen en conexión el tronco del encéfalo con estructuras del sistema límbico, sistema que gobierna nuestras emociones y motivaciones (núcleo accumbens, amígdala, etc.). La activación del sistema de recompensa se realiza a partir de un mecanismo mediado por receptores de péptidos opioides. A la misma conclusión había llegado el grupo de Elliot Gardner, de la Facultad de Medicina Albert Einstein de Nueva York, utilizando una cepa de ratas de laboratorio especialmente sensibles a los efectos de las drogas de abuso.



Amén de los conocidos efectos psicoactivos, responsables del consumo crónico de esta droga, los principios activos del cánnabis producen múltiples efectos farmacológicos

Nuestro grupo de la Universidad Complutense ha abordado el problema de la adicción a la marihuana desde el análisis del consumo prolongado. Los consumidores saben que el hashish no produce un síndrome de abstinencia aparatoso, lo que ha inducido a sugerir que la marihuana no engendraba dependencia (sólo un 9 por ciento de los consumidores acusan síntomas de abstinencia tras la interrupción brusca del consumo).

Los compuestos activos de la marihuana, los cannabinoides, son lipofílicos y se almacenan en el tejido adiposo. Tardan muchos días en eliminarse, razón por la cual no aparece el síndrome de abstinencia agudo. Pero ello no descarta la presencia de dependencia, entendida ésta como las neuroadaptaciones puestas en marcha para acostumbrarse a la droga.

Para poner de manifiesto la dependencia recurrimos a una estrategia farmacológica. Inyectamos un antagonista del receptor de cannabinoides en animales tratados crónicamente con un potente cannabinoide semisintético. Estudiamos la conducta, las variaciones en la concentración de glucocorticoides —hormonas del estrés— y el patrón de actividad neuronal. Y descubrimos una profunda dependencia, con intenso síndrome de abstinencia. Esta creaba un estrés intenso en el animal.

El síndrome iba asociado a una activación selectiva de la liberación del neuropéptido CRF en el núcleo central de la amígdala, que sabemos que es el organizador de las respuestas endocrinas, autónomas y conductuales asociadas al estrés. Al comparar nuestros resultados con los obtenidos para el consumo crónico de alcohol y de heroína, aparecía un sorprendente solapamiento: el síndrome de abstinencia a cannabinoides no difería del descrito para etanol o heroína.

La activación del CRF en la amígdala o el intenso reclutamiento de los

núcleos subcorticales implicados en la respuesta al estrés vienen a coincidir en las tres drogas. En las tres se dan alteraciones convergentes en la vía neural común cuya activación durante la abstinencia supone un estado aversivo que fomenta el mantenimiento del consumo, la cronificación del mismo y la dependencia.

La importancia de estos hallazgos es clara para definir el estatuto de la marihuana. En primer lugar, se debe desterrar su condición de "blanda" en tanto que es confusa e incierta y no supone una información veraz para el potencial consumidor. En segundo lugar, el hecho de que su consumo crónico induzca las mismas neuroadaptaciones que las inducidas por el alcohol o la heroína, en los mismos sistemas cerebrales que controlan los procesos motivacionales, ayuda a entender por qué el consumo de hashish suele preceder al de heroína según han demostrado múltiples estudios epidemiológicos (la llamada "hipótesis de la escalada del consumo de drogas"). En tercer lugar, la existencia de una vía común de convergencia para los efectos de estas drogas permitiría diseñar estrategias terapéuticas unitarias para la adicción.

MIGUEL NAVARRO
y FERNANDO RODRÍGUEZ DE FONSECA
Instituto Complutense
de Drogodependencias
Depto. Psicobiología.
Facultad de Psicología.
Universidad Complutense, Madrid.

Arquitectura funeraria

Tholo etrusco

Entendiendo como tholo toda construcción rotonda, definiremos tholo funerario etrusco al túmulo o montículo artificial que abrigaba y emblematizaba a la "casa de los muertos" o tumba de la sociedad etrusca.

El origen de la civilización etrusca resultaba misterioso y obscuro incluso para los autores de la antigüedad. Heródoto habla de una gran colonización del siglo XIII a.C. procedente de Lidia. Diodoro negaba que los etruscos tuvieran algo en común con los lidios; si había que buscarles alguna similitud con otro pueblo, sería con los pelasgos. Dionisio de Halicarnaso, en su *Historia Antigua de Roma*, postula que los tirrenos o etruscos constituyeron una colonia autóctona del Po. Da la impresión de que, como escribió en el primer cuarto de nuestro siglo Massimo Campigli, "el vocablo etrusco es un comodín al que se recurre para todo lo que no se conoce bien".

Los etruscos mantuvieron un espíritu abierto. En todas sus manifestaciones artísticas muestran clara influencia, primero oriental y, muy pronto, griega. Las tumbas rupestres del período jónico etrusco, con sus fachadas esculpidas en el rocoso acantilado de Sovana, Norchia y Castel d'Asso, revelan un estrecho parentesco con las de las plataformas de Anatolia.

El pueblo etrusco se estableció en la Italia occidental, en lo que vendría a ser la actual Toscana. Sus emplazamientos fueron elegidos con tal acierto, que las ciudades medievales se afincaron sobre ellos. Desde su arquitectura para muertos, podemos, pues, conocer, su arquitectura para vivos y su estructura sociopolítica y familiar.

Cuanto hemos descubierto del mundo etrusco lo hemos aprendido a través de sus necrópolis, de sus tholos. Para el etrusco, la relación entre la tumba y la casa, o entre la polis y la necrópolis, no fue sólo física, sino que entre la sociedad de vivos y la comunidad de muertos existían razones religiosas de coexistencia. En este sentido, desde la organización interior de los "túmulos monumentales" de Cerveteri, además de restituirse la estructura de la casa e incluso del templo, se adivina la existencia de la estructura aristocrática y matriarcal de este pueblo.

En la región italiana en que se asentaron, el suelo es de tufa volcánica, un material pétreo, bastante blando, fácil de cortar en losas o en bloques. Se emplea, asimismo, para la construcción subterránea. Ideal para ser esculpido, no ha sido mal soporte de la pintura. Las tumbas de Tarquinia han mantenido sus frescos en magníficas condiciones.

Las tumbas rupestres de los acantilados de Norchia, donde la cubierta de la casa villanoviense sirvió de modelo para los techos, labrados en la roca, muestran sus fachadas, a modo de viviendas, esculpidas a gran altura. En Fiora, siguiendo el dromo de la tumba François, se desciende a 30 m de profundidad entre dos impresionantes paredes cortadas en la tufa. Estos techos esculpidos muestran toda la jerarquía de vigas de las cubiertas de madera. De la calidad de labra nos dan fe el techo en artesa con compluvium de la tumba excavada de Corneto, el empinado techo de la tumba de los Volumnii en Perugia y los techos planos de la tumba de las Sillas y de la tumba de los relieves ambas en Cerveteri.

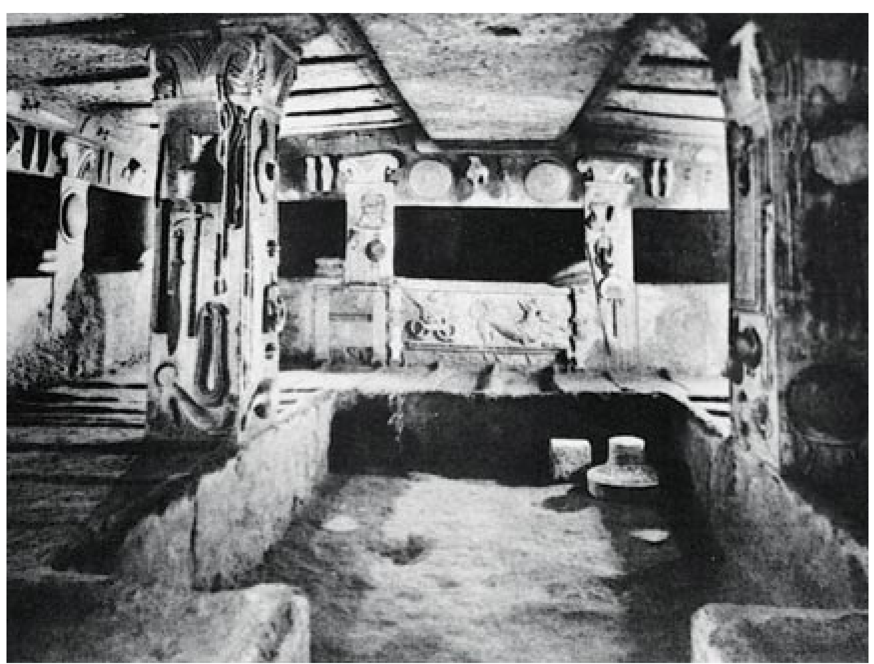
Estas condiciones ideales de la tufa les permitió reproducir muebles y aperos de labranza en sus necrópolis e hizo que, con independencia de otras razones de ritos y creencias, la tumba excavada y el tholo se-



1. Tholo monumental, necrópolis de Cerveteri



2. Tholo de Mulas, Quinto Fiorentino



3. Interior de un tholo (tumba habitación), Cerveteri



4. Alineación de tholos de planta cuadrada, en Crocefisso del Tufo, Orvieto

miexcavado, cubierto con falsa bóveda, se desarrollaran. Así, la forma constructiva más interesante, en razón a la enorme frecuencia con que se dio en todo el país, la constituyen los tholos funerarios de túmulos artificiales conformados sobre cúpulas o falsas bóvedas de hiladas planas avanzadas, colocadas totalmente en horizontal.

Los etruscos incineraban a sus muertos. Así lo manifiestan las interminables urnas cinerarias que encontramos en Volterra, Chiusi y Arezzo. Durante el siglo VI se desarrolló la inhumación, en desmesurados sarcófagos; a ello se debe la aparición de tumbas familiares en forma de túmulos monumentales construidos con grandes bloques de tufa, acabados con total perfección y donde cada tholo contenía los grandes sarcófagos de varios miembros del clan familiar. En Cerveteri, Tarquinia, Perugia y Orvieto, las necrópolis, agrupaciones de muertos, ocupan una enorme extensión.

A partir de la tipología estructural de la tumba en tholo monumental surgieron los pequeños túmulos de planta cuadrada que encontró, en su resolución, dos formas características: el tholo sin soporte y el tholo con soporte central.

El tholo-túmulo monumental mantiene, en su falsa bóveda, la misma ejecutoria constructiva que los pequeños tholos de Casale Marítimo o de los tholos asociados del Crocefisso del tufo, en Orvieto. En todos, la bóveda, se levantaba por hiladas o anillos planos superpuestos, donde cada piedra vuela ligeramente sobre la inmediata inferior. De ese modo, el leve vuelco de los sillares quedaba contrarrestado por el peso propio de la parte entregada y por las tierras que iban conformando el túmulo.

Algunos emplazamientos merecen singularizarse. Por ejemplo, en Quinto Fiorentino encontramos el Tholo de Mulas que, semienterrado, arranca con planta cuadrada e introduce, en las esquinas, pechinas de lajas para terminar generando una bóveda de sección horizontal circular, de doble curvatura, que le permite alcanzar mayor altura en su clave.

En Casale Marítimo, al oeste de Siena, al finalizar el siglo VII se levantó uno de los más bellos tholos de pequeña planta cuadrada y soporte central. En su falsa bóveda, de hiladas cada vez más salientes, las piedras son totalmente uniformes y forman círculos perfectos, con total continuidad de aristas. Así lo vemos también en la tumba del Diavolino, en la necrópolis de Vetulonia. En Crocefisso del Tufo en Orvieto y en los bordes de la propia necrópolis de Benditaccia en Cerveteri, se levantaron, durante el siglo VI-V, alineaciones de tholos adosados, en calles rectas y paralelas.

FRANCISCO ORTEGA ANDRADE
Departamento de Construcción
Universidad de Las Palmas

Climatología

Proyecto ACE-2

Las predicciones de cómo se comportará el clima en un futuro a medio y largo plazo se fundan en modelos numéricos. Pero la calidad de las predicciones depende de la bondad de los modelos. Estos se evalúan realizando "predicciones" para el tiempo presente. Si dicha "predicción" coincide con el clima actual de la Tierra, el modelo merece confianza.

Los modelos calculan un aumento en la temperatura global de la Tierra de 2 a 4 grados centígrados desde el último tercio del siglo pasado, mientras que las observaciones muestran un aumento promedio de menos de un grado. ¿Falla el modelo o existen parámetros que no se tienen en cuenta? Recientes investigaciones apuntan a que el factor que falta en los modelos es el efecto de los aerosoles en la radiación.

Los aerosoles de la atmósfera son partículas en suspensión cuyo tamaño varía de nanómetros a milímetros. Los humos de coches, chimeneas e incendios forestales son ejemplos de aerosoles antropogénicos. El polvo del desierto y las partículas de sal del mar constituyen aerosoles naturales.

Las partículas afectan al clima básicamente de dos maneras: como dispersores de radiación y como núcleos de condensación. En el primer caso las partículas reflejan la radiación proveniente del Sol. En una escala global, la reflexión de la luz por los aerosoles se espera que enfríe la Tierra.

El vapor de agua que se congrega alrededor de los núcleos de condensación termina por formar gotitas de agua. A medida que aumenta el número de partículas de aerosol, crece la reflectividad de las nubes, provocando de nuevo un enfriamiento global.

Podemos consolidar los modelos climáticos si verificamos las descripciones de cada uno de los procesos en que lo podamos dividir. Algunos de esos procesos admiten una comprobación experimental en el laboratorio; por ejemplo, la absorción de la luz por un gas de efecto invernadero. Otros obligan a mediciones en el mundo real, como es el caso de los aerosoles. Los experimentos de caracterización de aerosoles (ACE) se proponen precisamente esto.

El proyecto ACE debía identificar las propiedades de los aerosoles e investigar su evolución química y dinámica. El primer experimento (ACE-1) se desarrolló en el Océano del Sur (al sur de Australia), que al ser la zona menos contaminada del planeta permite estudiar los aerosoles en su forma natural. El ACE-2 tuvo lugar en el Atlántico Norte para estudiar los aerosoles antropogénicos procedentes de Europa y las partículas de polvo provenientes del Sahara. Los resultados obtenidos se integrarán en los modelos climáticos.

La región abarcada por el ACE-2 se extiende, de oeste a este, entre la costa de Portugal y las islas Azores, y de norte a sur, desde el extremo septentrional de Galicia hasta las islas Canarias meridionales. Se trata de una zona que no suele estar afectada por las borrascas de las latitudes medias. Estas borrascas provocan una mezcla de los diferentes estratos horizontales, haciendo muy complicado seguir la evolución dinámica de los aerosoles y la formación de las nubes. Domina el anticiclón subtropical de las Azores, desencadenante de los vientos alisios. La meteorología de la zona conduce a una fuerte estratificación vertical, simplificándose el transporte de aerosoles y la formación de nubes.

El ACE-2, concluido a finales de julio de 1997, llevó a cabo los experimentos a bordo de 60 misiones coordinadas de aviación con 6 aeroplanos y un barco. Además se realizaron medidas en estaciones de tierra en Sagres (en el sur de Portugal), Izaña, Punta del Hidalgo y Taganana (isla de Tenerife), Porto



Observatorio de Vigilancia Atmosférica Mundial de Izaña

Santo (islas Madeiras), San Miguel y Pico (islas Azores). El centro de operaciones del ACE-2 se instaló en Tenerife. El Instituto Nacional de Meteorología realizó medidas de concentración de aerosoles, medidas fotométricas diversas y medidas de espesor óptico de aerosoles. También se realizaron sondeos meteorológicos en la Punta del Hidalgo y en el Centro Meteorológico de Canarias Occidental en Santa Cruz de Tenerife. El Instituto Nacional de Meteorología proporcionó, además, el apoyo logístico inicial y las predicciones meteorológicas generales y específicas realizando el seguimiento de las masas de aire de la zona.

Los investigadores obtuvieron resultados del mayor interés. Se descubrió la intervención de aerosoles de naturaleza dispar: marinos del Atlántico, procedentes de la contaminación europea y polvo mineral de Africa (aunque mucho menos del esperado). Formados sobre Europa y Africa, los aerosoles recorren 3000 km y ejercen un efecto notable en las propiedades radiativas, particularmente en la capa de estratocúmulos sobre el nordeste Atlántico. Los aerosoles de polvo y de polución son transportados sobre el Atlántico en capas distintas.

Las nubes que se forman en capas con concentraciones de aerosoles mayores tienen una mayor reflectividad que las nubes formadas en aire marítimo limpio. Con los datos recogidos por aviones y satélites, podremos relacionar las propiedades reflectantes de las nubes con las propiedades físicas y químicas de las partículas de aerosoles sobre las cuales se formaron las gotas de nubes.

Se realizaron tres experimentos de seguimiento de masas de aire, uno en una masa de aire oceánica bastante limpia, otro sobre una masa de aire ibérica con aerosoles de contaminación recientes y otro sobre una masa de aire de Europa Central con aerosoles de polución viejos. En las masas de aire de Africa y Europa, la concentración de aerosoles está predominantemente determinada por procesos cercanos a las fuentes continentales. No se conoce bien cómo se produce la concentración de aerosoles en condiciones oceánicas limpias. La nucleación de nuevas partículas se iniciaba a menudo en la costa de Portugal. No había prácticamente nucleación en la capa de mezcla ni en la imperturbada troposfera libre de Tenerife.

Las medidas locales tomadas en aviones sugieren que el polvo mineral de Africa tiene cierto efecto en la química de la fase gaseosa dentro de la capa de polvo.

Se activaron partículas pequeñas desde 40 nm para formar gotitas de nubes en las masas de aire marítimas atlánticas. La química del agua de nube consistía en iones marinos con un *p*H típico de 5,5. En las masas de aire contaminadas de Europa se activaron muchas más partículas y el *p*H del agua de nube fue típicamente de 3,5, es decir, mucho más ácido.

El experimento ACE-2 es el mayor de los realizados hasta la fecha sobre aerosoles atmosféricos. El número de científicos que participan en el proyecto es de unos 250 procedentes de Europa y Estados Unidos. Gracias a este experimento se podrán mejorar sensiblemente los modelos climáticos globales y regionales.

XAVIER CALBET
Observatorio de Vigilancia
Atmosférica Mundial de Izaña,
Instituto Nacional de Meteorología
Sta. Cruz de Tenerife

Neuronas de la corteza visual

Orientación selectiva

Nuestro conocimiento de la corteza cerebral de los mamíferos se basa en los resultados aportados por la investigación de su organización funcional. En ese dominio, se busca siempre determinar el correlato anatómico de la actividad que las neuronas de la corteza desempeñan ante estímulos visuales.

En 1957 Vernon Mountcastle extraía una primera consecuencia: las neuronas de la corteza cerebral que presentan respuestas similares ante un estímulo se agrupan en módulos o columnas, que se extienden perpendiculares desde la superficie cerebral hasta la materia blanca.

A principios de los sesenta, David Hubel y Torsten Wiesel investigaban la corteza visual primaria, cuyos resultados les harían acreedores del Nobel. Demostraron que la organización en columnas se daba en toda la corteza visual, de suerte tal que las propiedades de las células cambiaban gradualmente y formaban un mapa que representaba sin discontinuidad el campo visual.

En el mapa, y a lo largo de determinada dirección, todas las columnas exhiben la misma dominancia ocular, o sea, responden preferencialmente a estímulos visuales cuando éstos se presentan ante uno de los dos ojos. A lo largo de la misma dirección, la orientación selectiva cambia gradualmente y cubre todas las orientaciones posibles; la orientación selectiva puede ser, por ejemplo, la respuesta emitida ante un estimulo visual constituido por un borde luminoso presentado en cierta orientación.

De las columnas situadas en la perpendicular a la dirección conside-

rada, las vecinas se alternan en su respuesta a cada ojo o dominancia ocular, mientras que todas las columnas de esa dirección tienen una orientación selectiva semejante. La caracterización de este mapa visual en columnas de dominancia ocular y orientación selectiva reviste sumo interés, pues revela que las regiones adyacentes de la corteza ejecutan tareas visuales semejantes y aportan claves decisivas para entender de qué modo los rasgos distintivos de los objetos externos se representan en la corteza cerebral.

Pese a que se ha venido ratificando en estudios ulteriores las líneas generales de esa disposición, se ha polemizado bastante sobre la topografía precisa. El origen del problema radica en la confección de los mapas, levantados a través del registro eléctrico de neuronas individuales, procedimiento que se repite innumerables veces insertando el electrodo en diversos puntos de la superficie cortical. Este método, tedioso, no permite una caracterización fina, pues depende del numero y densidad de penetraciones.

Pero se han utilizado también otros métodos para cartografiar entera la corteza visual. En uno de ellos, se introduce en la corteza glucosa radiactiva (2-desoxiglucosa), que no pueden metabolizar las neuronas. Las células que desarrollen una mayor actividad ante la presentación de un estímulo visual, acumularán el azúcar, posibilitando su ulterior identificación. A través de ese método se obtienen mapas detallados de las columnas de dominancia ocular. Pero no podemos aplicar el mismo enfoque al mapa de orientación selectiva, por la sencilla razón de que con un solo estímulo no cabe levantar más de un mapa.

Mapa de orientación selectiva obtenido con señales intrínsecas de la corteza visual de un gato. Cada color representa una región de la corteza que contiene columnas que responden a estímulos con determinada orientación (codificadas por las barras de color); las columnas convergen en áreas que parecen oscuras. En estas regiones carentes de color no podemos discernir la orientación selectiva porque la señal óptica presenta la misma intensidad para cualquier orientación del estímulo

Gracias al progreso de otros métodos más recientes nos es dado abordar la arquitectura y función de la corteza cerebral *in vivo*. Logramos mapas de alta resolución mediante compuestos sensibles a potenciales, e incluso sin ellos, a través de la manifestación de la superficie del cerebro en lo que se denominan *señales ópticas intrínsecas*. Se funda este método en los cambios operados en las propiedades ópticas de la superficie cerebral cuando ésta se activa. Si las neuronas descargan pulsos eléctricos con más frecuencia, necesitan entonces mayor aportación de oxígeno con el cambio consiguiente del color de la sangre que fluye a través de ese grupo de neuronas. Este cambio en el color puede detectarse por una cámara de vídeo muy sensible que filma la superficie expuesta de la corteza. Aunque la resolución temporal dista de acercarse a la del registro eléctrico, este método permite comparar la actividad inducida por cuantos estímulos diferentes se desee.

Merced al método de las señales ópticas intrínsecas se ha descubierto que las columnas corticales que responden a la misma orientación no están organizadas en filas de columnas paralelas, sino en configuraciones circulares, cual rueda de carreta. En el mapa de orientación selectiva obtenido con señales intrínsecas de la corteza visual de un gato, cada color representa una región de la corteza que contiene columnas que responden a estímulos con cierta orientación y que convergen en áreas que parecen oscuras. En las zonas obscurecidas no podemos discernir la orientación selectiva porque la señal óptica presenta la misma intensidad para cualquier orientación del estímulo. ¿Significa esto que las neuronas de esas regiones carecen de orientación selectiva?

En un estudio reciente publicado en *Science*, combinábamos el método óptico de señales intrínsecas con un nuevo método de registro eléctrico. Utilizamos un tétrodo (microelectrodo que consta de cuatro filamentos conductores), que nos permite discriminar con gran precisión la actividad eléctrica de un grupo de neuronas adyacentes, basado en la diferente señal obtenida con cada filamento.

Los registros con tétrodos realizados en las regiones oscuras del mapa muestran que las neuronas de esas áreas son tan selectivas a la orientación de estímulos visuales como las neuronas de las otras regiones del mapa. La ausencia de color se

debe entonces a que la organización columnar desaparece por culpa de la mezcla de muchas neuronas, cada una con una orientación selectiva distinta. No se ha investigado aún la función de estas áreas especiales en el mapa visual.

PEDRO E. MALDONADO
Instituto de Ciencias Biomédicas,
Facultad de Medicina
Universidad de Chile

Herbicidas

y cosechas

La población mundial ronda los 6000 millones de personas, con una tasa de crecimiento anual del 1,6 %. Si continúa ese ritmo, la población doblará su cifra de aquí a 44 años. Para hacer frente a tal demanda alimentaria, habrá que extraer mayor rendimiento de los recursos agrícolas. En las últimas décadas se ha incrementado la producción vegetal con los avances técnicos, fitosanitarios, abonos y otros. Pero los resultados potenciales quedan frecuentemente menoscabados por plagas, enfermedades y malas hierbas.

Las malas hierbas llevan conviviendo con el hombre desde el Neolítico, cuando apareció la agricultura en Oriente Próximo. Muy pronto el hombre tuvo que combatir las especies autóctonas que competían con los cultivos y dificultaban el laboreo.

El desarrollo de productos químicos para controlar las malas hierbas es relativamente reciente. De forma ocasional se había utilizado la sal común para suprimir la vegetación de ciertas áreas. A principio de siglo también se usaron sulfato de cobre y sulfato de hierro. Pero el inicio de la síntesis y desarrollo de los herbicidas se fecha en 1944 con la introducción del 2,4-D (ácido 2,4-diclorofenoxiacético), que supuso un cambio radical en el control de las malas hierbas.

De entonces acá el número de ingredientes activos o moléculas de herbicidas no ha dejado de crecer; habiendo actualmente registrados más de 130. También su importancia económica ha aumentado. En el año 1996 se gastaron en nuestra nación un total de 20.310 millones de pesetas en ese concepto, lo que nos da una idea de su dimensión económica.



La presencia de malas hierbas en los cultivos puede llegar a impedir la producción de cosechas, causando pérdidas económicas muy importantes

La aplicación de herbicidas incrementa el rendimiento. Lo observamos, por ejemplo, en la evolución reciente de la producción de trigo en España. A comienzos de los años cuarenta, antes de que se difundieran los primeros herbicidas hormonales, el rendimiento medio de trigo no llegaba a los 1000 kilogramos por hectárea. Para satisfacer la demanda de una población en rápido crecimiento se aumentó la superficie triguera, que en los años cincuenta superaba ya los cuatro millones de hectáreas. A partir de 1960 comienza una nueva fase con la introducción de variedades mejoradas, abonos adecuados y empleo de herbicidas. Hoy, el rendimiento medio del trigo está por encima de los 2000 kg/ha. Además, el mejor rendimiento ha permitido reducir la superficie dedicada a este cultivo en beneficio de otros. Ese mérito se debe, al menos en su mitad, a los herbicidas, de los que se han empleado más de 4880 Tm en los últimos años.

Pero existen riesgos. La falta de precauciones en el manejo de los herbicidas puede crear problemas de toxicidad a los trabajadores. La lixiviación de algunas substancias hacia capas freáticas puede contaminar los acuíferos; el arrastre superficial con las aguas de lluvia puede dañar ríos y embalses. Y lo que es peor, el uso continuado del mismo tipo de herbicidas puede originar a medio o largo plazo la aparición de biotipos de malas hierbas resistentes.

Para evitar tales inconvenientes, deberíase combinar la aplicación del herbicida con otras prácticas. Hacia eso apunta la llamada "gestión integrada de plagas", que no se limita a la mera combinación de diversos métodos de control, sino que va más allá y postula racionalizar su uso. Ello exige un profundo conocimiento de las interacciones agente-plaga y la ejecución de tratamientos en el momento y con las dosis necesarias.

Determinados cultivos transgénicos llevan incorporados genes de resistencia a los herbicidas. Las investigaciones realizadas en esa línea se centran en torno a herbicidas con un perfil ecotoxicológico bastante bueno; por eso, las repercusiones ambientales del uso de estos cultivos son, en principio, favorables.

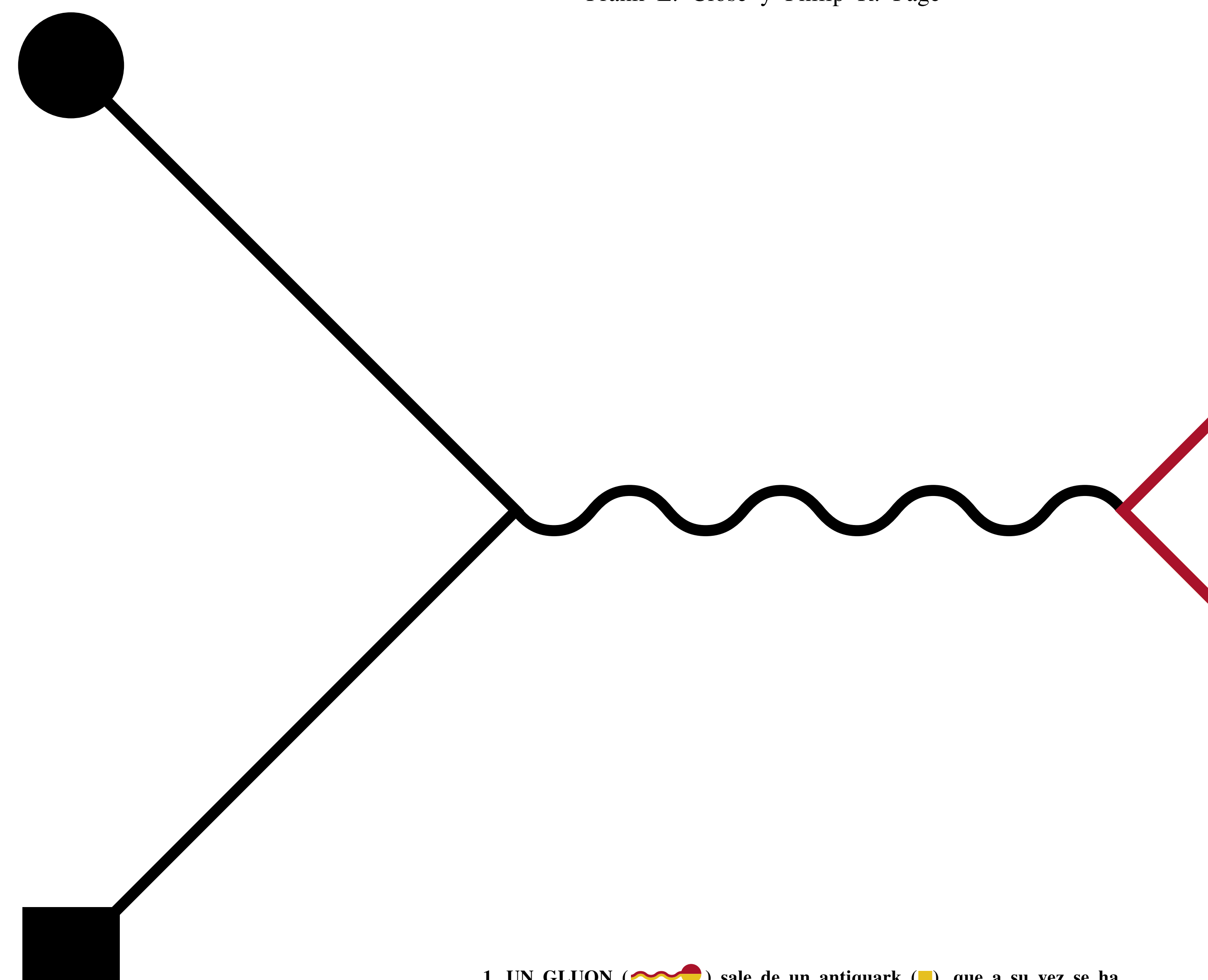
Pero tampoco la nueva técnica se halla exenta de riesgos. En primer lugar, cabe admitir que aparezcan biotipos de malas hierbas resistentes e "inversión de flora" (substitución de las especies de malas hierbas sensibles a un producto por otras que no lo son).

JOSÉ LUIS GONZÁLEZ ANDÚJAR
y CÉSAR FERNÁNDEZ-QUINTANILLA
Instituto de Agricultura Sostenible
(CSIC), Córdoba
y Centro de Ciencias
Medioambientales
(CSIC), Madrid

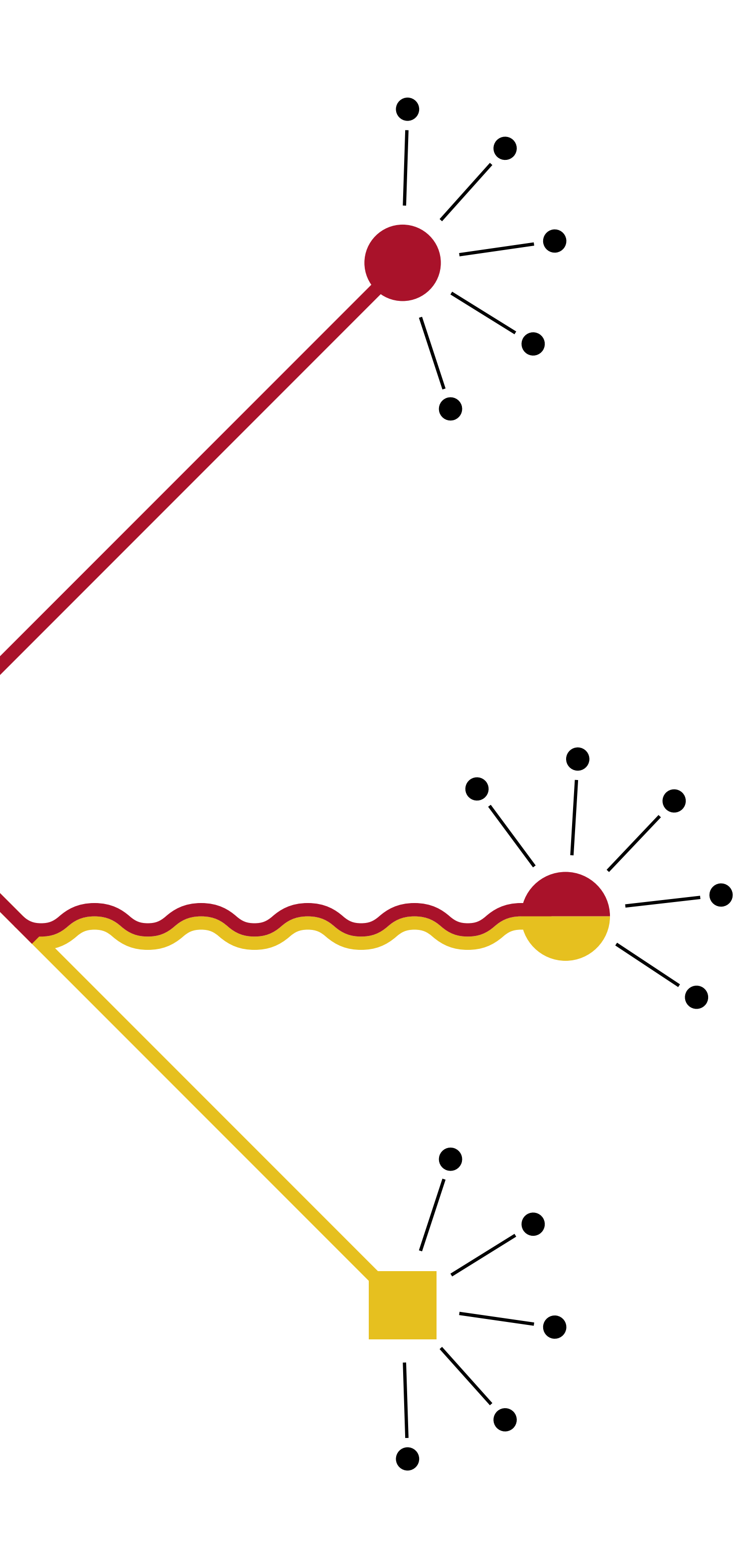
Glubolas

Los gluones, que mantienen juntos los protones, crean también bolas de puro pegamento

Frank E. Close y Philip R. Page



1. UN GLUON ( ) sale de un antiquark ( ), que a su vez se ha creado junto a un quark ( ) a partir de un fotón ( ). El fotón procede de la aniquilación de un electrón ( ) con un positrón ( ). Un quark, un antiquark y un gluon llevan cargas de "color" gracias a las cuales interaccionan por medio de la fuerza nuclear fuerte. Una carga de color y su anticolor (u opuesto) se representan aquí con el mismo color; por convención, todas las líneas coloreadas son continuas. Como a la naturaleza le repugna el color, el quark, el antiquark y el gluon se combinan con otras partículas y producen cascadas, o "chorros" ( ), de objetos sin color, que son los observados en los experimentos. El electrón, el positrón y el fotón no tienen carga de color, ni están sujetos a la interacción fuerte. El tiempo pasa de izquierda a derecha en este diagrama de Feynman. Richard Feynman inventó tales esquemas como ayuda del cálculo.



No hay átomos de luz. Los fotones no se unen entre sí para formar entidades compuestas. Pero los gluones, las partículas del pegamento (*glue*) con que los quarks, unidades básicas de la materia, se enlazan entre sí y crean objetos compuestos —los protones, por ejemplo—, sí pueden adherirse unos a otros. A los agregados resultantes se les llama "glubolas".

Con un radio de $0{,}5 \times 10^{-15}$ metros, inferior al del protón, las glubolas viven menos tiempo del que la luz tarda en cruzar un átomo de hidrógeno. Por efímeras que parezcan, los físicos están convencidos de que han dejado ya su huella en los experimentos.

El hallazgo de una glubola culminaría una historia apasionante. Hacia los años sesenta se sabía ya que algunas partículas observadas en los experimentos estaban compuestas por objetos menores, los quarks, que además de carga eléctrica mostraban otras características más raras. De una de ellas, el sabor, hay seis variedades, de nombres caprichosos: arriba, abajo, encanto, extraño, cima y fondo. Otra es la carga de "color"; un quark arriba, por ejemplo, tiene tres básicos: rojo, amarillo o azul.

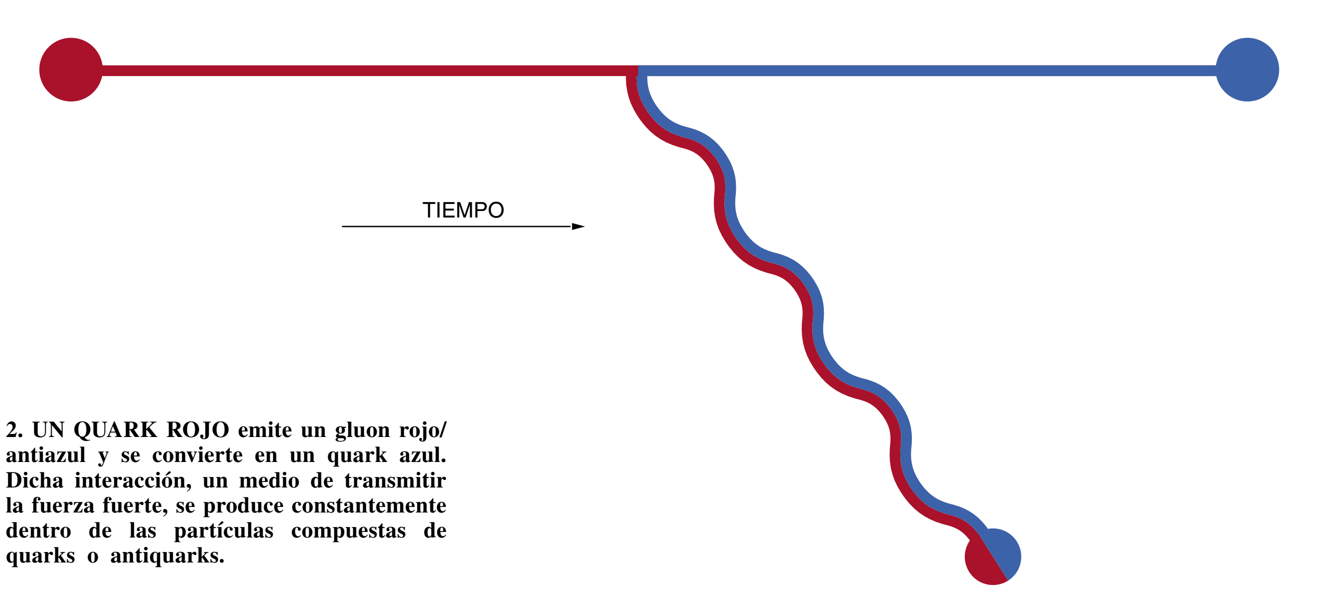
Un quark azul se enlazará a uno rojo y uno amarillo y formará un objeto "blanco", sin carga de color. El resultado será un protón, un neutrón o cualquiera de los innumerables compuestos de tres quarks denominados bariones. (A este tipo de carga se le llama "color" porque las tres modalidades suman cero, lo mismo que los tres colores primarios construyen el blanco.) La atracción entre diferentes colores es la fuerza o interacción nuclear fuerte, que une los quarks en esos objetos mayores y estables.

Los quarks pueden, además, juntarse con los antiquarks, de cargas opuestas a las suyas. Los antiquarks tienen anticolores: antirrojo, antiamarillo o antiazul. (Desde un planteamiento matemático, un anticolor es un color negativo. El antirrojo es un "menos rojo".) Los colores opuestos se atraen. Un quark rojo se enlazará con uno antirrojo y formarán un objeto blanco, un mesón. El más común de los mesones es el pion, que se observa a menudo en las reacciones nucleares.

Las cargas eléctrica y de color se parecen en otras cosas también. La teoría del electromagnetismo describe la atracción entre las cargas eléctricas opuestas. Al fundirse en los años cuarenta el electromagnetismo con la relatividad y la teoría cuántica se creó una nueva rama de la física fundamental, la electrodinámica cuántica. Según esta teoría —la de mayor éxito de toda la física—, la fuerza electromagnética se transmite mediante unos objetos carentes de masa, los fotones. Estos cuantos de la luz arruinan la idea clásica de la acción a distancia, pues rebotan por ejemplo entre un electrón y su antipartícula, el positrón, de manera tal que atraen el uno hacia el otro.

La teoría equivalente de las cargas de color, que se comunican por medio de la interacción fuerte, es la cromodinámica cuántica. En este caso los transmisores, los cuantos sin masa de la fuerza fuerte, son los gluones.

Se distinguen de los fotones. Estos juntan las partículas con carga eléctrica, pero carecen de ella, así que no pueden atraerse o repelerse entre sí. Los gluones, en cambio, sí están coloreados. Un quark rojo, por ejemplo, puede convertirse en uno azul



2. UN QUARK ROJO emite un gluon rojo/antiazul y se convierte en un quark azul. Dicha interacción, un medio de transmitir la fuerza fuerte, se produce constantemente dentro de las partículas compuestas de quarks o antiquarks.

radiando un gluon rojo/antiazul. Un gluon puede atraer a otro.

Así se singularizan ante sus primos electromagnéticos. Los fotones rodean un electrón uniformemente, le hacen una corteza con simetría esférica; su densidad, además, cae con la distancia de manera que la atracción entre un electrón y un positrón disminuye con el inverso del cuadrado de la distancia que los separa. Los gluones no se distribuyen tan uniformemente, sino que se aglomeran en un tubo que conecta el quark y el antiquark. Puede considerarse que el color que se origina en el quark "fluye" por el tubo de gluones hacia el antiquark, donde es absorbido.

Cuando se extiende el tubo, tira con fuerza constante, cualquiera que sea su longitud. Haría falta energía infinita para estirarlo hasta el infinito, es decir, para separar un quark y un antiquark; por eso, nunca hay en la naturaleza quarks libres: a la naturaleza le repugna el color. Pero el tubo gluónico que mantiene unido un mesón puede romperse en dos partes. Los cabos coloreados de los nuevos tubos son quarks (o antiquarks); un mesón se descompone en dos.

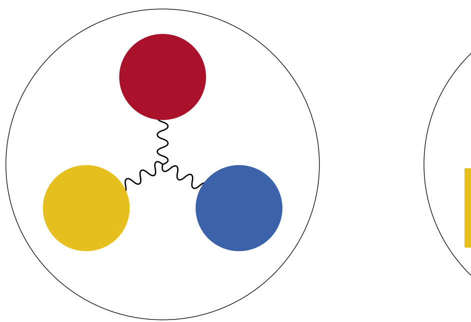
Que los gluones actúen así, al menos en teoría, concuerda con lo que se observa. Pero, ¿son reales? La prueba más clara de su existencia procede de la aniquilación de un electrón con un positrón. La energía liberada cuando se combinan suele renacer en forma de quark y antiquark, que en principio vuelan en direcciones opuestas; el tubo entre ellos se descompone en una cascada de mesones y bariones, y se ven, pues, dos chorros de partículas compuestas manando en direcciones contrarias.

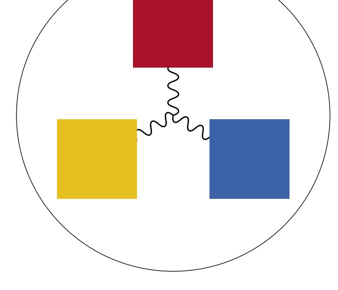
A veces, sin embargo, el quark o el antiquark emiten un gluon y se producen tres chorros. Estos tríos se observaron en 1979, en el DESY, el Sincrotrón de Electrones Alemán, de Hamburgo. Afortunadamente tenían las propiedades que los teóricos de la cromodinámica cuántica habían predicho. Esos experimentos confirmaron también que los gluones podían emitir gluones.

Otras investigaciones del DESY, en las cuales se hacía que penetraran electrones de gran energía en los protones para estudiar su estructura interna, han discernido también la presencia de los gluones. Las partículas cuentan con otras vías para mostrarse. Por ejemplo, los mesones hechos de quarks o antiquarks pesados tienen las masas que se les espera precisamente en caso de que el cuanto de la fuerza de color posea el momento angular intrínseco 1, como los gluones.

Pero los gluones podrían, además, manifestarse directamente. Harald Fritzsch y Murray Gell-Mann predijeron que dos o más gluones —un rojo/antiazul y un azul/antirrojo, por ejemplo— podían combinarse y crear una partícula fuertemente enlazada, de color neutro y puro pegamento. A este objeto hipotético se le llamó glubola. Un gluon podía enlazarse con un mesón y formar un híbrido; así, en principio, un quark rojo y antiquark antiazul se enlazaban con un gluon azul/antirrojo y producían una combinación blanca.

Se trataba de una idea elegante, pero la cromodinámica cuántica es una teoría embrollada. La peculiar naturaleza de la fuerza fuerte hace imposible los cálculos exactos. Casi todo lo que sabemos del color y del pegamento no procede del cálculo directo, sino de las gigantescas simulaciones de ordenador de





3. EL BARION (*izquierda*) es en conjunto de color neutro, o "blanco". Los bariones comunes son el protón y el neutrón. Los quarks de un protón interaccionan entre sí mediante el intercambio de gluones; alteran perpetuamente su color. Un antibarión (*derecha*), pensemos en un antiprotón, contiene un antiquark antirrojo, uno antiazul y uno antiamarillo.

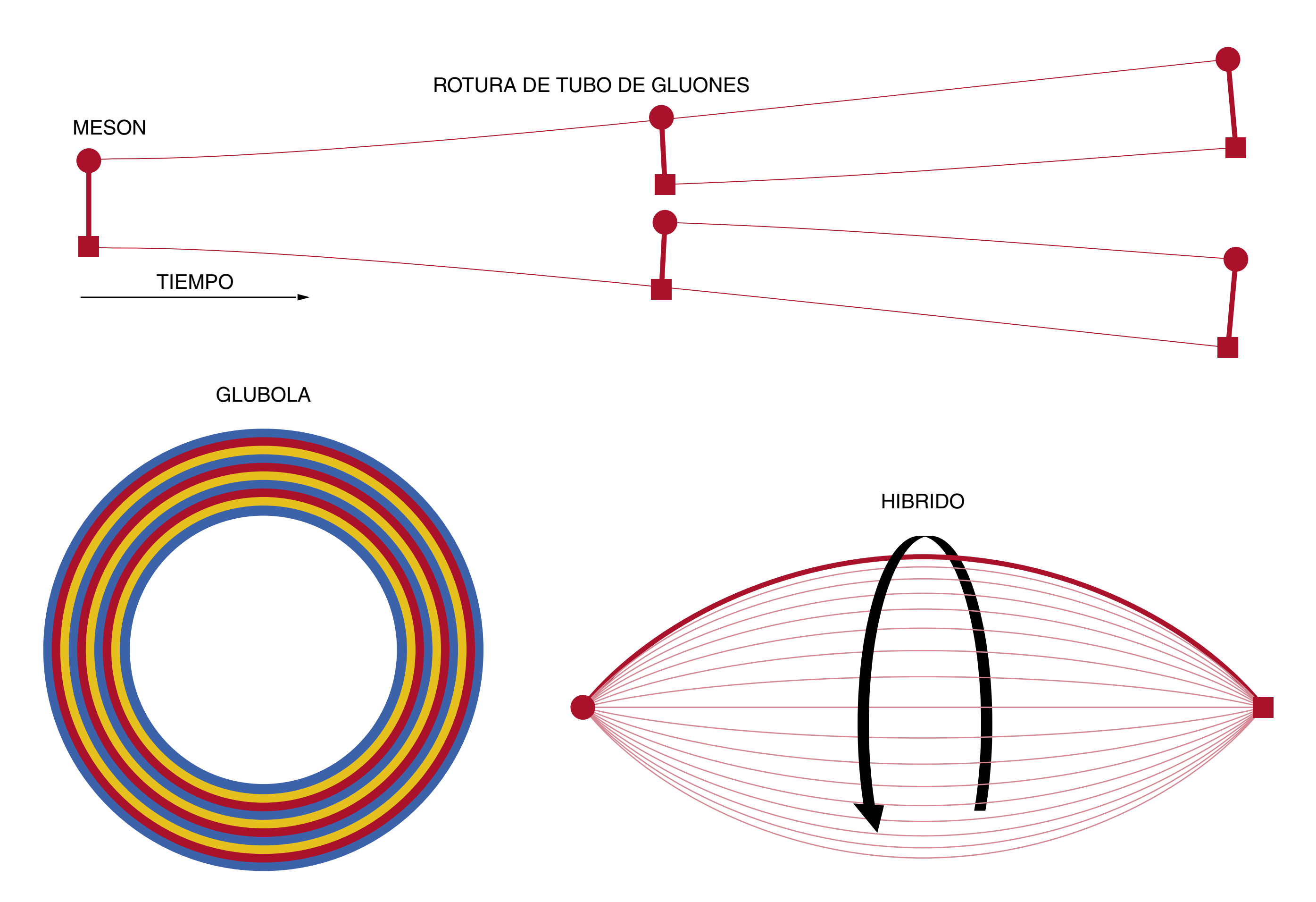
FRANK E. CLOSE y PHILIP R. PAGE abordaron juntos las excitaciones gluónicas en 1992, en la Universidad de Oxford, donde Close supervisó la tesis de Page. Close es vicepresidente de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia. Page se halla adscrito al Laboratorio Nacional de Los Alamos.

la cromodinámica cuántica reticular. Para esta teoría, el espacio-tiempo es una retícula. Un quark podría hallarse en uno de los puntos de la retícula, conectado por una línea a un antiquark en otro punto. Cuando se hace un cómputo de este estilo sale un ente de puro pegamento, una línea gluónica que se cierra sobre sí misma cual serpiente que se muerde la cola; esa anilla constituye una tosca representación de una glubola.

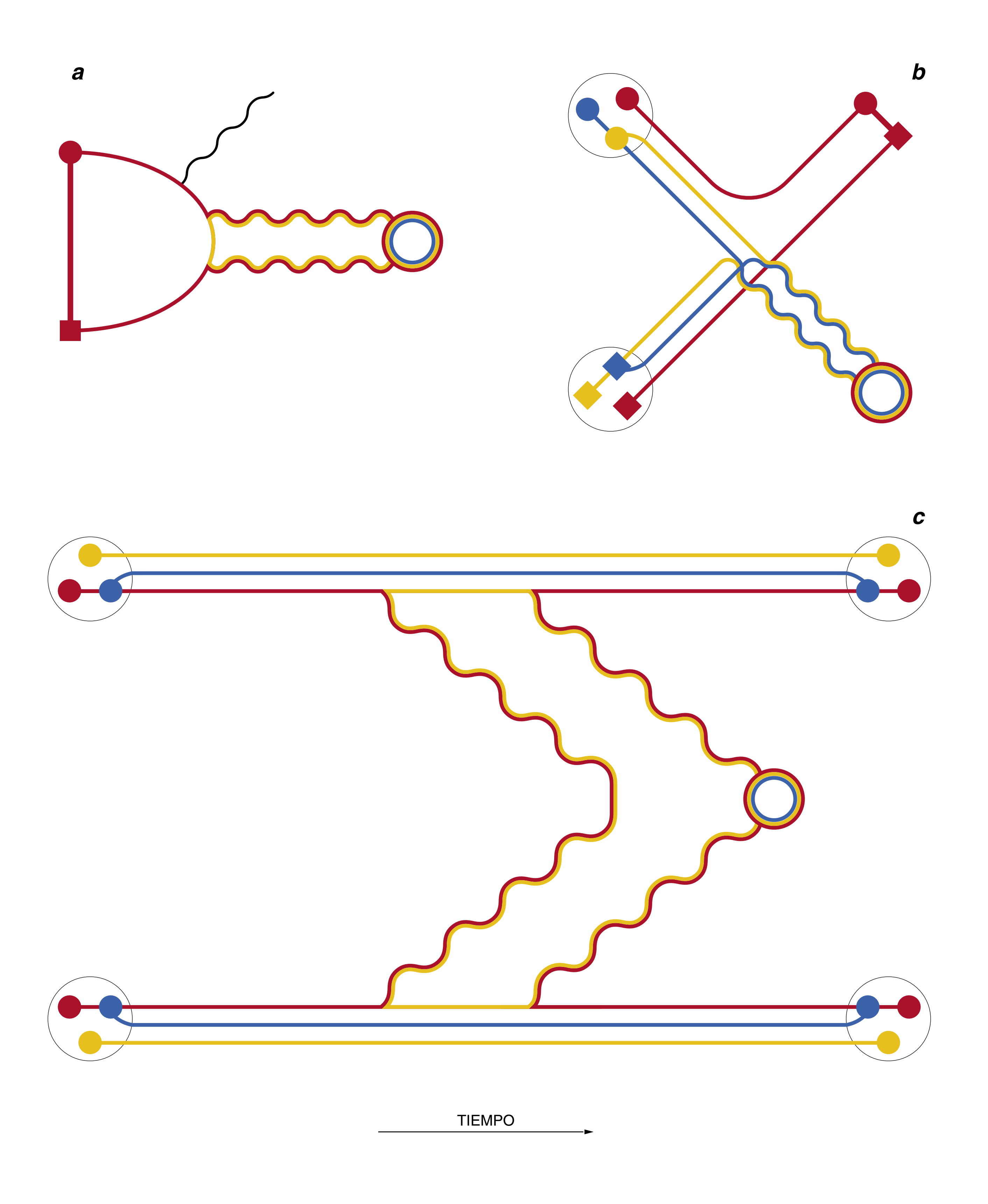
La glubola más ligera que permite la teoría corresponde a un tubo circular de pegamento y carece de momento angular. Según la mecánica cuántica, un objeto sin momento angular debe tener la simetría de una esfera. Y el anillo de pegamento puede orientarse en cualquier dirección, así que la función de onda que lo describe es, en resumidas cuentas, una corteza esférica. Las funciones de onda de las glubolas con otras figuras, oblongas, no son esféricas; tienen, pues, masas mayores y momento angular.

A veces el tubo de pegamento que conecta el par quark-antiquark está flojo y no yace en el eje de la conexión, sino que cuelga del mismo. Puede entonces girar alrededor del eje, a la manera de una cuerda de saltar. Cabe ver estas configuraciones como poseedoras de un gluon adicional, es decir, son las que corresponden a los híbridos mencionados antes. La rotación requiere una energía considerable; la masa o energía interna total de un híbrido será, por tanto, mayor que la de un mesón solo.

También un mesón corriente (que no esté ligado a un gluon extra) puede rotar, pero lo hará alrededor del eje perpendicular a la línea que une el quark y el antiquark que dicha partícula contiene. Los mesones de la menor energía no tienen una rotación tal; se les describe como onda S. Un mesón de onda S (el pion, por ejemplo) se desintegra en dos mesones de onda S. Rara vez, en cambio, se desintegra así un híbrido, porque el momento angular que su peculiar rotación le confiere ha de conservarse. Por eso se predice que se desintegrará en un mesón de onda S y otro de vida corta con algún momento angular interno, que a su vez se desintegrará en dos mesones de onda S. En resumen: el híbrido



4. MESONES, GLUBOLAS E HIBRIDOS son tres tipos de compuestos en los que participa un tubo de gluones. El mesón, tipo de partícula cuya observación es común, consta de un quark y un antiquark conectados por un tubo de gluones. Se puede considerar que el color se origina en el quark y “fluye” hacia el antiquark. Si el tubo se rompiese en algún punto, los cabos coloreados harían de quark y antiquark, y se producirían dos mesones. En los cálculos una glubola aparece como un anillo de puro pegamento. Puesto que los colores de los gluones se anulan mutuamente, la glubola debería en teoría ser bastante estable. Un híbrido, otra partícula hipotética, es un mesón en que el tubo de gluones rota alrededor de la línea que conecta el quark y el antiquark. Es decir, se trata de un mesón con un gluon adicional.



5. LOS PROCESOS RICOS EN PEGAMENTO son lugares prometedores para buscar glubolas. Un mesón ψ puede desintegrarse dando dos gluones, que se unen en una glubola (*a*). O un protón podría estrellarse contra un antiprotón y sus quarks interaccionar con los antiquarks del segundo, de manera que se produjese la emisión de dos gluones y un mesón (*b*). Los gluones pueden combinarse en una glubola. Además, cuando dos protones chocan de frente, sus quarks constituyentes se comunican mediante el intercambio de gluones (*c*). Dos de esos gluones podrían fundirse en una glubola, que se desintegraría y daría dos piones u otros mesones.

anunciará su presencia mediante la producción de tres mesones de onda S, al menos.

"Todos hablaban de los híbridos, pero nadie movía un dedo por ellos", podría decirse parafraseando a Mark Twain. A los experimentadores les es difícil detectar los tres mesones emitidos en una desintegración; de ahí su escaso empeño por observarlos.

En diciembre de 1994 concluimos un cálculo de todas las desintegraciones posibles de los híbridos sirviéndonos de un modelo en el que el tubo de pegamento está constituido por una cadena de bolas que representan a los gluones; sus resultados son similares a los del cálculo reticular, pero iluminan más situaciones. (El cálculo reticular no puede, por ahora, describir las desintegraciones de los híbridos; quizá podrá pronto.) Nos emocionó caer en la cuenta de que podría haberse descubierto ya un híbrido, ese mismo año.

En el verano de 1994 el Instituto ruso de Física de Altas Energías de Protvino había comunicado la aparición en las colisiones de piones y protones de un objeto llamado π(1800). (El número entre paréntesis indica la masa en millones de electronvolt, o MeV.) Esta partícula tiene las características y el patrón de desintegración que se esperarían de un híbrido.

Por desgracia, sigue siendo incierta la naturaleza de π(1800). Pero se han recogido indicios de la existencia de unos híbridos especiales, denominados exóticos. Un mesón se caracteriza por varios números cuánticos: su momento angular interno (J), su apariencia reflejada a través de su centro (paridad, o P) y su identidad cuando se intercambian las partículas por las antipartículas (conjugación de carga, o C). Los exóticos presentan combinaciones de estos tres números vedadas a los mesones. El exótico más simple tiene $J = 1$, $P = -1$ y $C = +1$. (El mesón ordinario con $J = 1$ tiene $P = -1$ y $C = -1$.)

En 1997, el Laboratorio Nacional de Brookhaven anunció un posible hallazgo de este exótico, también en un experimento de haces de piones y blancos de protones. Poco después, en el CERN, el laboratorio europeo de física de partículas, cerca de Ginebra, el proyecto de cooperación Crystal Barrel daba cuenta de las señales recabadas sobre el mismo exótico. Pero estos objetos no se observaron por su desintegración en tres mesones S; se buscaban dos mesones S, el η (eta) y el π (pion). (Estos no son los productos más abundantes de la desintegración de un exótico, sino los que pueden detectarse con más facilidad.) Hace muy poco el grupo de Brookhaven ha informado de indicios de un exótico de una masa diferente. Sigue todavía debatiéndose mucho si estas partículas son o no exóticos genuinos.

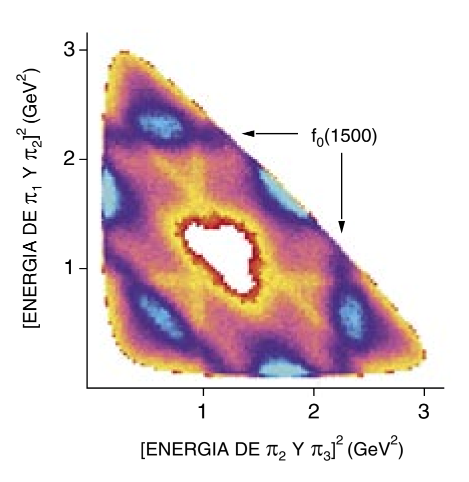
Más difícil aún está resultando dar con las glubolas, porque la mayoría de los experimentos comprueban la presencia de productos finales hechos de quarks y antiquarks. Un proyecto de cooperación, cuyo centro es la Universidad de Edimburgo, predijo en 1993, con la teoría de redes, una masa de las glubolas de 1550 MeV. Poco después, Donald Weingarten, del Centro de Investigación Thomas J. Watson de la IBM, y sus colaboradores les calcularon una masa de 1740 MeV. Luego les predijeron una vida de 10^{-24} segundos. Este lapso minúsculo en realidad es lo bastante largo para que se las pueda detectar.

En algunos congresos de aquellos días uno de nosotros (Close) insistió en que debería emprenderse la busca experimental de las glubolas en el intervalo de masas entre 1500 y 1800 MeV, sin saber que el proyecto Crystal Barrel estaba empezando a desvelar un objeto de vida breve, el $f_0(1500)$. Su momento angular (indicado por el subíndice) es 0 y su masa cae entre los valores predichos. El objeto en cuestión podría ser la glubola más ligera.

O quizá no. Durante más de diez años ha habido indicios del objeto $f_J(1710)$, cuyo momento angular J no se ha determinado aún. Si J es 0, será un rival aspirante a que se le reconozca como glubola.

Por si estas ambigüedades no confundiesen ya bastante, la mecánica cuántica empeora las cosas al dictar que dos objetos con los mismos números cuánticos y masas parecidas pueden mezclarse. Los cálculos predicen dos mesones de los mismos números cuánticos que la glubola en la misma región de masas. La glubola se combinaría con estos mesones y produciría tres objetos finales que en parte serían pegamento. Y lo cierto es que $f_0(1500)$ y $f_J(1710)$ parecen poseer unas características que señalarían que se trata de una semiglubola. Por desgracia las pruebas no son concluyentes.

A principios de este año empiezan a tomar datos en los Estados Unidos y en Japón unos aceleradores que producen grandes cantidades de mesones B. Entre otras aplicaciones, esos mesones ofrecen una prometedora nueva vía para la generación de glubolas e híbridos.



6. DIAGRAMA DE DALITZ de una colisión entre un protón y un antiprotón. Podría llevar en sí la prueba de la existencia de una glubola. La reacción produce tres piones, dos de los cuales quizá procedan de la desintegración de una glubola. Cada eje representa el cuadrado de la energía combinada de dos de los tres piones. Una región de intensidad aumentada (*azules*) indica una partícula de vida breve que produjo piones de una energía determinada. Las bandas de azul oscuro a 2,2 GeV^2 corresponden a una partícula denominada $f_0(1500)$, posiblemente una glubola (1 GeV = 10^9 electronvolt).

También se emprenden este año unos experimentos de precisión encaminados a esta búsqueda en la Instalación Nacional del Acelerador Thomas Jefferson en Newport News. Y en el 2001 se incorporarán unos investigadores del CERN. Uno de estos experimentos, esperamos ciegamente, mostrará pruebas inequívocas de pegamento sin contaminación alguna.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE QUARK STRUCTURE OF MATTER. Frank Close en *The New Physics*. Dirigido por Paul Davies. Cambridge University Press, 1989.

GLUEBALLS AND HYBRIDS: NEW STATES OF MATTER. F. E. Close en *Contemporary Physics*, volumen 38, núm. 1, págs. 1-12; enero de 1997.

PARTICLE PHYSICS: EXOTIC MESON PLAYS HARD-TO-GET. F. E. Close en *Nature*, vol. 389, págs. 230-231; 18 de septiembre, 1997.

Vertidos naturales de petróleo

MANCHAS DE PETROLEO

1. BANDAS LARGAS Y OSCURAS derivan bajo las nubes en esta vista aérea. Se trata de fugas de petróleo procedentes del subsuelo marino del golfo de México.

En el golfo de México, región conocida por sus múltiples yacimientos de petróleo y gas, la mayor parte del crudo que fluye por el océano procede del goteo que se produce, de manera natural, desde las grietas del fondo marino.

Ian R. McDonald



2. CUANDO UNA GOTA de petróleo asciende desde el fondo e irrumpe en la superficie del mar, expandiéndose, se perfila una mancha de brillo polícromo. Esta mancha tenía el tamaño de una ensaladera.

Bajo el golfo de México, al sur de Texas y Louisiana, minúsculas burbujas de gas y petróleo ascienden por las fisuras de los sedimentos marinos. Ya casi en la superficie del fondo marino, antes de filtrarse hacia el océano suprayacente, estos hidrocarburos fluyen por una última capa rebosante de exótica vida submarina. Se elevan, flotando y adoptando diversas formas de penachos, hasta alcanzar, ocasionalmente, la superficie. Cuando tal sucede, el gas se dispersa en la atmósfera. Mientras, el petróleo flota y circula a merced del viento, se evapora, se mezcla con el agua y termina por dispersarse.

El verano es la mejor época para observar estos vertidos naturales de petróleo, cuando el golfo permanece varios días en calma. A media tarde, con el calor del sol tropical abrasando el mar y a bordo de una embarcación, pueden observarse inmensos cinturones de petróleo que se extienden hacia el horizonte. Navegando rumbo al viento, a lo largo de las manchas, se evidenciará la inusual suavidad que adopta el mar y cómo parece incrementarse la claridad del agua e intensificarse el resplandor del sol sobre su superficie. Hasta los peces voladores saltan y se sumergen de nuevo sin salpicar. La presencia de petróleo es ahora manifiesta, se percibe su olor distinto del diesel quemado por el barco y se ve brea flotando o adherido al casco.

De repente, minúsculas gotas de petróleo irrumpen en la superficie del agua formando pequeños círculos irisados que rápidamente aumentan de tamaño para luego desaparecer, dispersándose después de combinarse con la viscosa capa que recubre el agua. Siguiendo el rumbo, proa al viento, el mar recupera su aspecto, el agua se oscurece, las suaves brisas provocan de nuevo pequeños oleajes y los peces voladores vuelven a sumergirse con su sonido característico. El barco ha dejado atrás la marea negra, pero todavía quedan muchas otras. He oído contar a los guardacostas cómo, antes de entender el fenómeno, habían perdido horas y horas sobrevolando las manchas en busca del buque responsable de la fuga.

La continua liberación de hidrocarburos submarina se asemeja mucho a los efectos de los vertidos furtivos, aunque aquélla es consecuencia natural de las peculiaridades geológicas que hacen del golfo de México una de las mayores cuencas petrolíferas del mundo.

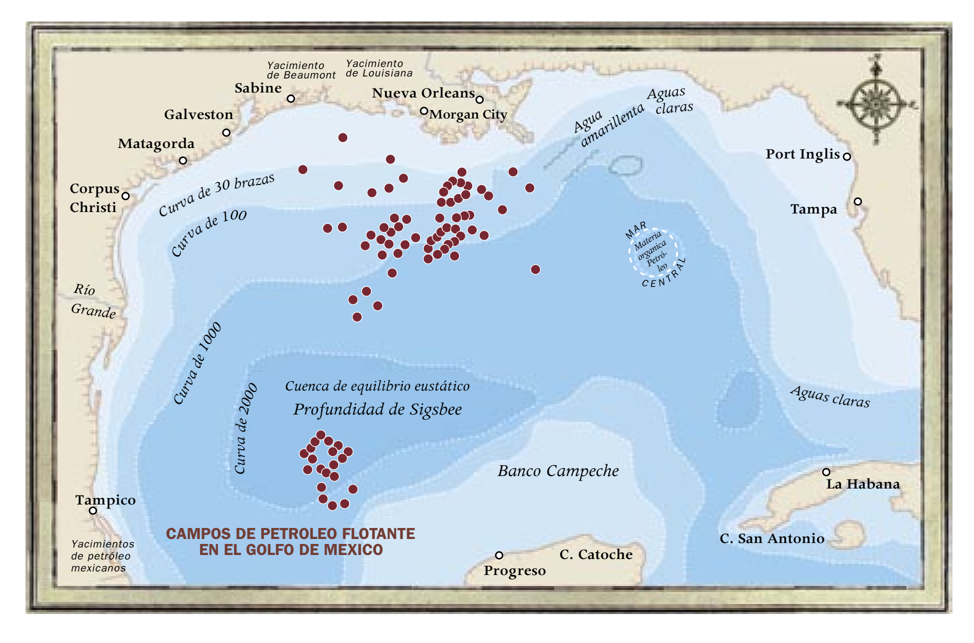
El petróleo procedente del fondo del golfo, y en eso no es ninguna excepción, se forma porque la energía geotérmica calienta la materia orgánica de las rocas sedimentarias. Con el tiempo, los hidrocarburos generados ascienden desde los estratos más profundos hasta quedar atrapados en los poros de las areniscas, las fisuras de los esquistos o en los restos calizos de antiguos arrecifes.

El golfo sobresale por la abundancia y variedad de sus rocas y de sus "trampas" geológicas para el petróleo. Destaca también por la existencia de un antiguo lecho de sal precipitada durante los repetidos episodios de evaporación del período Jurásico, hace unos 170 millones de años. Esta formación, denominada Sal de Louann, subyace bajo la mayoría de los campos de petróleo de la región y, si bien es plástica, resulta de difícil compresión. A lo largo del tiempo geológico, el peso de los sedimentos acumulados, en su mayor parte de origen continental, ha desplazado la sal hacia arriba y hacia fuera, creando pliegues, agujas y capas, estructuras que, en ocasiones, mantienen contacto con el estrato madre y, en otras, forman cuerpos independientes que se reparten por los sedimentos inmediatos.

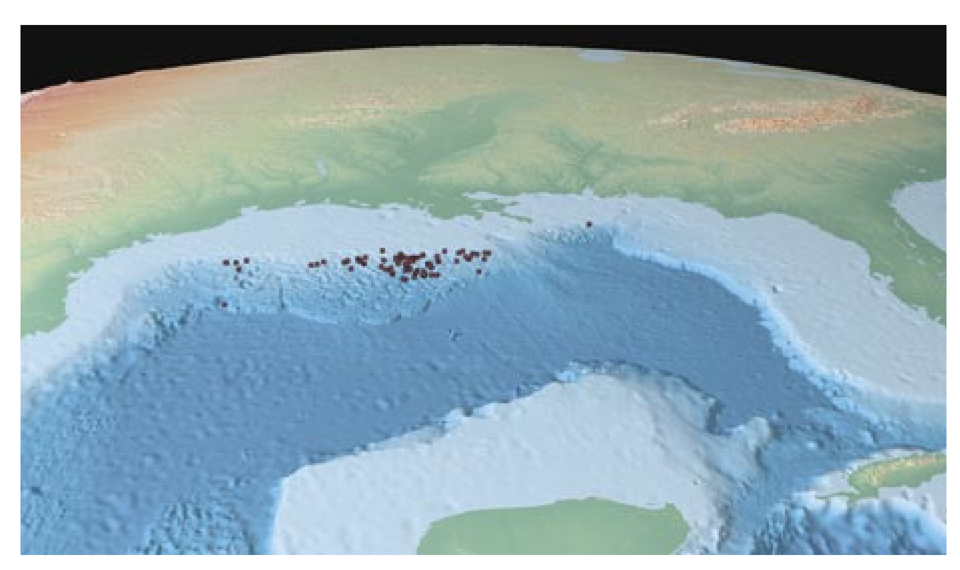
Este tectonismo de la sal condiciona el modo de migrar de los hidrocarburos. Unas veces el petróleo puede quedar atrapado bajo estratos de sal, por ser impermeable ésta. Otras, el movimiento de la sal produce grandes fallas que facilitan y canalizan la filtración oceánica de los hidrocarburos.

La existencia de tales estructuras convierte al golfo de México en un lugar único que ocupa, además, una posición preponderante en la historia de la industria petrolera. De hecho, la producción submarina de gas y petróleo nació allí con la instalación en 1947, en la costa de Louisiana, de la primera plataforma petrolífera del mundo. Con los años las explotaciones fueron adentrándose en el océano conforme el progreso de la ingeniería permitía la extracción de crudo a mayores profundidades.

Los efectos económicos y sociales de esta expansión lo impregnan todo. Resulta ahora imposible pensar en la costa del golfo de México sin que nos vengan a la mente la indumentaria de los empleados, las platafor-



3. LA COMPILACION QUE REALIZO SOLEY de mareas negras observadas entre 1902 y 1909 (*puntos rojos, arriba*) muestra la preponderancia de las avistaciones al suroeste del delta del Mississippi. La posición actual de manantiales de hidrocarburos localizados en el fondo marino del golfo de México, determinada mediante métodos modernos (*puntos, abajo*), evidencia que muchos manantiales activos a principios de siglo persisten hoy.



mas, torres de extracción, oleoductos, buques petroleros y refinerías. En un grado no alcanzado en ningún otro lugar del mundo, los habitantes del golfo viven sobre las aguas y trabajan en su seno para satisfacer el insaciable apetito de petróleo de nuestra sociedad.

Los vertidos naturales de petróleo ofrecen una nueva y fascinante perspectiva. Para muchos, la existencia de tales filtraciones constituye un motivo de sorpresa. No debiera, dada la copiosa documentación histórica. Desde los instrumentos precolombinos hallados en la región que muestran el uso local de la brea para sellado, hasta registros de manchas de petróleo documentados por los españoles que datan del siglo XVI. Es ya en 1910 cuando aparece el primer estudio sistemático de estas mareas, publicado por el teniente de la armada de los Estados Unidos John C. Soley, curiosamente, en *Scientific American* ["The Oil Fields of the Gulf of Mexico", de John C. Soley; SCIENTIFIC AMERICAN SUPPLEMENT, n.º 1788, 9 de abril, 1910].

Soley revisó cuantas observaciones de petróleo en el mar habían ido registrando los diarios de a bordo. En el del *Comedian*, un carguero de vapor, se describen tres chorros de crudo ascendiendo hacia un punto de la superficie del mar. Esos relatos se escribieron varias décadas antes de construirse la primera plataforma petrolífera, en un tiempo que precedió también al uso generalizado del petróleo como combustible naval. El origen del crudo debía constituir, pues, todo un enigma.

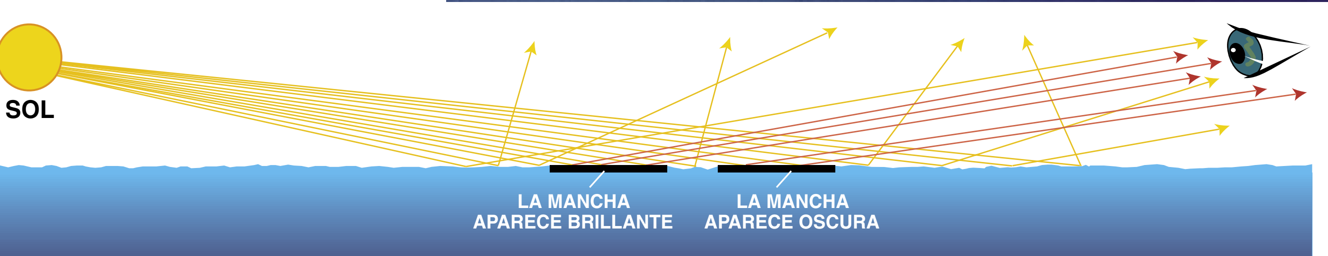
Para la petrogeología moderna, las teorías de Soley sobre el origen del crudo pecan de ingenuidad, al menos en los pormenores de la explicación; atribuía una naturaleza inorgánica a buena parte del encontrado lejos de la costa. Ello no obstante, aún hoy, los relatos de esos marineros anónimos, referentes a las mareas negras, las aves pringadas, las partículas de brea y el agrio hedor del petróleo, nos recuerdan las ya demasiado familiares imágenes de las fugas modernas. Las descripciones decimonónicas de las mareas negras resultan tan espectaculares, que uno se plantea si las filtraciones hacia el océano no eran entonces más frecuentes y mayores que en la actualidad.

Soley tuvo que fiarse de descripciones anecdóticas y de una deficiente navegación para cartografiar las fuentes de las filtraciones. Nunca pudo imaginarse que las propiedades físicas y químicas del petróleo en suspensión lo hacían visible desde grandes distancias, ni que la ciencia podría, por tanto, seguir su pista en enormes extensiones.

Cuando una película de crudo excede las cuatro micras de espesor, que sería el grosor de la marea negra resultante de un accidente de navegación, adopta un color que abarca del marrón rojizo al tostado. En contacto con la atmósfera, la fracción volátil del petróleo se evapora de inmediato, quedando un residuo ceroso que, con el agua del mar, forma una emulsión espumosa que tiende a coagularse en pequeñas motas flotantes y pegajosas bolas de brea. En espesores de entre una y cuatro micras, la lámina de crudo refracta la luz incidente y compone un reflejo multicolor parecido al que se produce en los bordes de los charcos. En el caso de las mareas negras de origen natural —de entre 0,01 micras a una micra— podrían formarse con escasas decenas de moléculas de espesor. Con los enlaces químicos entre hidrocarburos basta para generar una película de extraordinaria duración. Esa tenaz capa superficial impide la creación del oleaje que insta el viento. Sin oleaje, la superficie del océano refleja la luz solar con la eficacia de un espejo, lo que confiere a las manchas de petróleo su aire de pista deslizante.

4. REFLEJO DEL SOL observado por los astronautas del transbordador *Atlantis* en órbita sobre el golfo de México. Muestra varias mareas negras (*fotografía de la derecha*). Próximas al centro del resplandor, donde el reflejo de la luz solar es más intenso, las manchas brillan; en la periferia aparecen oscuras. Hay que atribuir esa disparidad a la superficie de la marea negra; cual un espejo, refleja los rayos del sol en dirección al observador en el primer caso (*líneas rojas, abajo*) y en otras en el segundo. Por contra, la superficie rugosa del agua exenta de crudo que tiende a dispersar la luz incidente en ambos casos, aparece más uniforme.





El contraste entre el reflejo de la capa de petróleo y la dispersión normal de la luz en el mar permite, bajo determinadas condiciones, localizar las mareas negras. Con el sol en un ángulo adecuado, las manchas se detectan sin problemas desde una embarcación, desde un avión e incluso desde una nave espacial.

Desde un transbordador, cuando el sol se refleja en el mar, los astronautas divisan las manchas y estudian las corrientes oceánicas. Allí donde hay manchas de petróleo, el centro del reflejo de la luz solar brilla mucho más que las aguas exentas. La situación se invierte en la periferia de la escena, donde la geometría de la iluminación desvía los rayos de luz respecto al observador y las manchas aparecen más oscuras que las aguas circundantes.

Las manchas también aparecen oscuras bajo la "iluminación" del radar, ya que el emisor del haz se encuentra en la misma posición que el detector, por lo común oblicuo con respecto al agua. La llegada de radares incorporados en satélites (Satélite Radárico Europeo, RADARSAT y radares de los transbordadores espaciales) ha supuesto que casi cualquier fenómeno del océano pueda seguirse tomando por referencia las manchas de petróleo. Y así, nos servimos de los reflejos en el radar de las manchas naturales para conocer la circulación marina. Los resultados obtenidos alcanzan un nivel de precisión y detalle impensable con el instrumental oceanográfico tradicional. Por otro lado, la geología puede aprovecharse de estas observaciones, captadas desde el espacio, para buscar signos que revelen dónde se esconden nuevos campos petrolíferos.

La teledetección aplicada a los escapes naturales requiere, a modo de condición previa, distinguir las películas finas que éstos crean de la vasta mayoría de las superficies reflectantes que ninguna vinculación guardan con el petróleo. Me refiero a bancos de peces, tapices vegetales de plancton que, concentrados por corrientes convergentes, generan manchas detectables por los radares. Pero las fugas naturales se distinguen a la primera.

En general, las pérdidas de gas y petróleo proceden de salideros agrupados y distribuidos a lo largo de un segmento de falla del fondo marino de unos pocos centenares de metros; manan de una fuente fija. Según los modelos matemáticos, una fuga continua de gotas de crudo que brota de un solo orificio y alcanza la superficie, mil metros de agua por encima, emergería desarrollando una extensión muy pequeña. Hipótesis que coincide con lo que sucede en el golfo de México, donde las superficies irisadas de las manchas de petróleo procedentes de estos salideros alcanzan una extensión de unos cien metros. Tras unas horas o unos días, las corrientes marinas que se hallan a diferentes profundidades acabarán por alejarlas. Por lo común, sin embargo, el petróleo emerge en superficie a uno o dos kilómetros de la vertical de su nacimiento. Por tanto, la detección reiterada de manchas en una posición estable en una misma zona de este tamaño nos está revelando en qué punto submarino se halla escondido el yacimiento petrolífero.

Este flujo, de abajo arriba, dibuja un perfil que no se deduce por pura

IAN R. MCDONALD conoció el mundo de la oceanografía al participar como voluntario en el desarrollo del sector pesquero de Haití. Después de su labor en el Instituto Oceanográfico Internacional de Malta y en la FAO, tanto en Roma como en Malta, volvió a los Estados Unidos y se incorporó a la Universidad A&M de Texas. Allí se doctoró en 1990 tras haber estudiado los ecosistemas de los salideros de petróleo del golfo de México. En la actualidad, sus investigaciones le han llevado hasta el Pacífico canadiense y el mar Caspio.



intuición. Peor. Esta puede inducir a error. Las comparaciones habituales —el penacho de humo de un cigarrillo— podrían sugerir que el extremo estrecho señala su origen, cuando la verdad es lo contrario. Las partículas de humo tienden a dispersarse; las del petróleo filtrado coagulan y forman múltiples bandas, visibles al alejarse de una unión de salideros.

En el comienzo de la fuga, las gotas de petróleo se expanden en la superficie recién alcanzada. Las gotas derivan movidas por corrientes y vientos. En principio, la gota que flote sobre el agua deberá extenderse hasta formar una lámina de una molécula de grosor. Lo cierto es que sus límites se reducen hasta el punto a partir del cual la mancha dejaría de existir como tal. Corriente abajo desde su punto de partida, la capa se vuelve muy delgada, del orden de 0,1 micras de grosor, aunque todavía superior al espesor de una molécula. Las bandas distintas persisten en su singularidad a cierta distancia hasta que acaban fundiéndose en una sola y desaparecer. La figura, pues, que dibuja la filtración y posterior formación de marea negra, es más ancha en su origen que en su extremo final.

La longitud de las manchas de petróleo depende del estado de la mar. En mar gruesa, una capa de petróleo se fragmenta pronto y no le da tiempo a derivar. En un día de calma, por contra, la capa de crudo se distingue a 25 kilómetros de distancia. Las curvas trazadas por las películas en sus trayectorias informan del tipo de viento que las empuja. Unas curvas amplias denotan cambios graduales en la dirección del viento; las curvas muy cerradas, casi en forma de V, cambios de dirección del viento muy bruscos. Del tiempo transcurrido entre un cambio repentino en la dirección del viento y el momento en que el satélite capta la imagen de la desviación resultante se infiere la duración de la marea negra. Apoyados en ese cómputo comparativo, mi equipo de la Universidad A&M de Texas ha llegado a la conclusión de que el petróleo visible de una filtración flota en la superficie durante un intervalo aproximado de entre 12 y 24 horas.

Las filtraciones naturales podrían reportar un servicio notabilísimo a los oceanógrafos interesados en cartografiar remolinos de difícil detección y a las compañías petroleras en busca de nuevos yacimientos. Otra cuestión es averiguar sus efectos sobre la vida marina. El conocimiento de la existencia de estas filtraciones en el golfo se propagó en los años ochenta. Por aquel entonces, mi colega Mahlon C. Kennicutt y sus compañeros de la A&M texana trabajaron con la hipótesis de partida según la cual la fauna de los salideros remedaría la que hubiera en zonas oceánicas expuestas a la contaminación petrolífera. Esperando encontrar especímenes enfermos, con la ayuda de redes de arrastre lanzadas sobre salideros activos, capturaron en una sola redada más de 800 kilogramos de *Calyptogena ponderosa*, un bivalvo insólito. La captura se realizó a gran profundidad, donde normalmente la presencia de vida es muy escasa.

Sumando las docenas de palitos, marrones y fibrosos, atrapados en las redes, el misterio estaba servido. Esos restos orgánicos les resultaron tan desconocidos, que a punto estuvieron los investigadores de arrojarlos por la borda, creyendo que se trataba de alguna planta arrastrada por el Mississippi. Hasta que un miembro de la tripulación pensó que le servirían para tejer cestos. Al distribuir los palitos, abrió algunos de ellos, que derramaron su sangre roja sobre la cubierta. Y comunicó a los demás su inesperado hallazgo.

Los especímenes se enviaron a expertos de todo el mundo. Empezaba una historia del mayor interés. Los hidrocarburos que fluyen desde el fondo del mar son una fuente de

5. ACUMULACION DE GAS HIDRATO y su asociación con un extenso repertorio de organismos de las profundidades, alrededor de un salidero. Así acontece en las emanaciones de gas del fondo del golfo de México (*izquierda*). El gas hidrato, sólido resultante de la combinación bajo altas presiones de gas natural y agua, es el hogar de un minúsculo animal apodado gusano de hielo (*micrografía electrónica, derecha*). Este poliqueto curiosísimo fue descubierto hace dos años por Charles R. Fisher, de la Universidad estatal de Pennsylvania, en el curso de una expedición en que intervenía el autor del artículo.



energía química que nutre a criaturas similares a la fauna encontrada, por primera vez en 1977, en los manantiales hidrotermales del océano Pacífico. Aquellos vermes tubulares vestimentíferos (los "palitos"), los bivalvos gigantes y una especie de mejillones adaptados a las grandes profundidades, medran en ambos hábitats mediante simbiosis con algunas bacterias. Al vivir en el interior celular de tales animales, estas bacterias sintetizan nueva materia orgánica utilizando, en ausencia de luz solar, la energía resultante de la oxidación del sulfuro de hidrógeno.

El hallazgo de estas criaturas en los salideros de petróleo del fondo del golfo de México despertó un renovado interés por semejante entorno. En 1986 encabecé la expedición que realizó las primeras inmersiones en zonas de filtraciones. Suponíamos los participantes que la búsqueda de los vermes tubulares resultaría correosa, pues llevarían a buen seguro una existencia marginal. Cuán errados andábamos. Topamos directamente con un ecosistema conformado por estratos de mejillones agrupados alrededor de fuentes de burbujeante gas y grandes manchas de bacterias de colores brillantes. Constituían el bocado deseado por peces, crustáceos y otros invertebrados, en número superior al que suele encontrarse en aguas a menor profundidad.

Estas comunidades abundan en el golfo de México. En algunos casos, la actividad biológica desarrollada en las fuentes de petróleo tiende a sellar los poros y las fisuras desde donde fluye el crudo. Los subproductos metabólicos de los microorganismos provocan la precipitación de carbonato cálcico que se acumula sobre los salideros y deja el petróleo sin salida. Por otro lado, las fuentes activas de gas pueden verse taponadas debido a la creación de gas hidrato.

El gas hidrato es una substancia de aspecto similar al hielo que se forma, bajo altas presiones y bajas temperaturas (aunque superiores al punto de congelación), cuando las moléculas de metano u otros gases quedan atrapadas entre la retícula de moléculas de agua. El gas hidrato recibió pronta atención al descubrirse que obstruía los gasoductos y obligaba a las compañías a gastar millones de dólares en aislar y calentar las conducciones submarinas. Más reciente es, por contra, la investigación científica en torno a la cristalización del gas hidrato en el fondo del mar.

¿En qué cuantía se cifra la fuga natural de petróleo en el golfo de México? Una mancha, de 0,1 micras de espesor medio, alcanza unos 100 metros de ancho a lo largo de unos 10 kilómetros, contiene unos 100 litros de crudo y su duración es de unas 24 horas o menos. Así pues, teniendo en cuenta la opción más prudente, mientras la marea permanece activa, se liberan al menos 100 litros diarios de petróleo y se dan al mismo tiempo unas 100 filtraciones; se estima que cada decenio se vierten al golfo de forma natural unos 40 millones de litros de crudo.

El accidente del *Exxon Valdez*, máxima expresión de los vertidos accidentales de petróleo, arrojó la misma cantidad de crudo al canal del Príncipe Guillermo en Alaska. Pero no hay que olvidar que las filtraciones del golfo de México se han ido produciendo a lo largo de más de un millón de años, período durante el cual el ecosistema se ha adaptado a la crónica "contaminación" de petróleo.

La comparación entre la liberación natural de crudo a través de las fallas y fisuras del fondo marino y las fugas accidentales durante su extracción y transporte resulta reveladora, se mantengan o no las analogías. Las pérdidas naturales de petróleo del golfo de México, como seguramente en otros lugares del mundo, han arrojado al mar tanto gas y crudo como la industria petrolífera. De todos modos, a pesar de que las cantidades totales sean muy parecidas, las tasas de extracción no lo son. La humanidad parece tener mucha más prisa en vaciar los yacimientos.

Esta diferencia explica por qué las filtraciones naturales no equivalen al accidente de un petrolero, del mismo modo en que es obvia la falacia de que la exposición al agua de una persona que se ducha a diario durante un año coincide con la de otra que se ahoga en una piscina. La existencia de estos vertidos naturales no justifica en modo alguno la contaminación producida por el petróleo. En mar abierto el ecosistema tolera cientos de toneladas de crudo mensuales esparcido en delgadas láminas a lo largo de decenas de miles de kilómetros cuadrados, pero la misma cantidad vertida en una zona de nidación de aves marinas acaba con la población. Asimismo, el fluir continuo de petróleo en un estuario podría desbaratar su ecosistema.

Importa que todos sepan que algunos vertidos de petróleo resultan perjudiciales, no así otros que forman parte del entorno marino. Se trata de distinguir entre ambos y actuar en consecuencia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

REASSESSMENT OF THE RATES AT WHICH OIL FROM NATURAL SOURCES ENTERS THE MARINE ENVIRONMENT. K. A. Kvenvolden en *Marine Environmental Research*, volumen 10, páginas 223-243; 1983.

NATURAL OIL SLICKS IN THE GULF OF MEXICO VISIBLE FROM SPACE. I. R. McDonald et al. en *Journal of Geophysical Reserach*, vol. 98, n.º C9, páginas 16351-16364; 15 de septiembre, 1993.

REMOTE SENSING INVENTORY OF ACTIVE OIL SEEPS AND CHEMOSYNTHETIC COMMUNITIES IN THE NORTHERN GULF OF MEXICO. I. R. McDonald et al. en *Hydrocarbon Migration and Its Near-Surface Expression*. Dirigido por D. Schumacher y M. A. Abrams. American Association of Petroleum Geologists Memoir 66, 1996.

Estrategias de cópula

Las arañas han desarrollado enigmáticos comportamientos de cortejo, que a veces termina en canibalismo

Ken Preston-Mafham y Rod Preston-Mafham. Fotografías de Ken Preston-Mafham



de las arañas

1. SUJETANDO LAS DEFENSAS DE LA HEMBRA para prevenir una posible picadura, un macho de la araña tejedora de largos quelíceros *Tetragnatha extensa* se prepara para la cópula. La hembra (*a la derecha*) está dispuesta; de otro modo hubiera advertido su negativa saltando y balanceándose en su tela. Además, da la bienvenida al macho con los quelíceros al descubierto, lo cual no parece indicar amenaza sino gesto de seducción. Con todo, la cópula requerirá unos 15 minutos, y el macho no tendrá ninguna posibilidad si la hembra está hambrienta. Pese a la tranquilidad de la hembra, el macho abandonará raudamente la tela en cuanto termine de copular.
Distribución: Eurasia y América septentrional; se muestra aumentada unas 27 veces respecto a su talla real.

El sistema reproductor de la araña guarda escaso parecido con el de cualquier otro grupo del reino animal. En la cabeza se insertan un par de apéndices denominados pedipalpos, que son estructuras sensoriales cuya función primordial estriba en percibir el gusto de una presa potencial. En el macho los segmentos terminales de los "palpos" están modificados y adaptados para introducir el semen en la hembra.

Los órganos del palpo, la estructura copuladora básica del macho, pueden asimilarse a una simple pipeta provista de una pera de goma. Desde una cámara que hace de reservorio, discurre un estrecho tubo, el émbolo, cuyo agudo extremo se halla perforado para que pueda pasar el semen. El macho introduce el émbolo en el orificio genital de la hembra durante la cópula. En ciertas familias de arañas el órgano del palpo se halla rodeado por placas esclerotizadas, ganchos y espinas. Simultáneamente, las hembras han desarrollado una estructura esclerotizada, el epigino, que se encuentra cerca del orificio genital; dentro de una misma especie las estructuras del palpo del macho encajan en el epigino de la hembra.

No hay conexión directa entre los órganos del palpo y los testículos. Por eso, el macho debe rellenar de semen los reservorios de dichos órganos antes de la cópula. Empieza por depositar una gota de semen en la seda de sus hileras. Esta seda puede ser un simple hilo extendido entre un par de patas, una tela poco tupida tendida de manera similar o, en las arañas más modificadas, una tela construida ex profeso y tendida en un sustrato adyacente. Luego, manteniendo el extremo del émbolo contra el semen, el macho lo bombea al reservorio. En algunas especies el macho rellena ambos órganos del palpo al mismo tiempo; en otras, rellena sólo uno, para volver, tras una primera acometida de cópula, a rellenar el otro. Repletos los reservorios de semen, se dirige a la búsqueda de una hembra apropiada y receptiva. (En la familia Linyphiidae, sin embargo, los machos inician la inducción del esperma si son estimulados por el contacto con feromonas depositadas en la tela de la hembra.)

Pudiera parecer que los machos de las arañas que tejen telas deben hacer frente a un problema insalvable para encontrar pareja: buscar en tres dimensiones. Pero vienen en su ayuda las propias hembras, que anuncian su presencia en la tela mediante la liberación de feromonas de orientación. Las hembras que no construyen telas permanentes, sino que van deambulando a la búsqueda de presas, siempre dejan un rastro de un hilo de seda impregnado de feromonas. Un macho de la misma especie que tope con dicho hilo podrá, pues, seguirlo

2. TEJIENDO UN VELO NUPCIAL DE SEDA el macho de araña lince (*Oxyopes schenkeli*) corteja a la hembra. Empieza por frotar el dorso de la hembra brevemente con sus patas delanteras (*izquierda*). La hembra, en respuesta, se aleja y deja caer el borde de una hoja, balanceándose en su hilo. El macho desciende y da vueltas en torno a ella, hilando seda alrededor del cuerpo de la pareja, cual si fuera a bobinarla (*centro*). Con la hembra bien arrollada, el macho intenta copular. Pero cuando termina la estación de la reproducción, época en que se tomaron las fotografías, la cooperación de la hembra puede detenerse de repente en cuanto acaba el proceso de hilado. La de la fotografía se escapó de sus ataduras y aprisionó al macho con los quelíceros (*derecha*), para devorarlo en la hora siguiente.
Distribución: Africa central, principalmente Congo y Uganda.





7x

3. COPULAR desde la madrugada al crepúsculo puede ser una estrategia de supervivencia para *Tylorida ventralis*, otra especie de araña tejedora de largos quelíceros. La hembra (*a la izquierda*) se muestra extraordinariamente cooperadora: no sólo copula todo el día, día tras día durante cerca de una semana con el mismo macho, sino que es ella la que toma la iniciativa. Este comportamiento puede ser propiciado por la presencia de diversas especies de arañas cazadoras de arañas en la región; contando con un compañero, las posibilidades de ser devorada disminuyen a la mitad.
Distribución: Asia del sur, hasta Nueva Guinea.





hasta dar con la hembra que lo tendió. Las hembras de la araña pescadora americana *Dolomedes triton* liberan sus feromonas dentro del agua, cerca de donde cazan, facilitando así su encuentro al macho.

Las arañas pueden también tomar parte en una suerte de cortejo. Varía éste desde un patrón elemental —el macho acude a la hembra y la induce a aceptarlo— hasta procedimientos más prolongados, en los que aquél puede aproximarse a la hembra y ser rechazado numerosas veces hasta lograr finalmente la cópula. En las especies de grandes ojos que son activas cazadoras, así las arañas lobo y las saltadoras, los machos exteriorizan sus intenciones a las hembras con sus palpos, dotados a menudo de colores rutilantes. Algunos machos someten físicamente a las hembras antes de la cópula.

La cópula puede resultar peligrosa para algunos machos. En un número limitado de especies —en especial las viudas— la hembra suele comerse al macho tras aparearse. En muchas arañas, sin embargo, los quelíceros del macho y de la hembra tienen el mismo tamaño. Por ser bastante más ágil el macho que la hembra, ésta puede correr un mayor riesgo de ser atacada por el macho que a la inversa. Además, la talla de algunas hembras multiplica varias veces la del macho, aunque éste parece contento de vivir en la misma tela.

Son formas de copular muy curiosas que han alcanzado un éxito manifiesto en las arañas.



4. VIGILANDO a una hembra en proceso de muda (*derecha*), un macho de *Leucauge nigrovittata* se asegura la cópula con una virgen. Tras recuperar su firmeza, el cuerpo de la hembra recién emergida vibra para atraer al macho. Después de la cópula el macho se aleja, pero la hembra le incita un par de veces más. Sin embargo, la cópula fue interrumpida por una segunda hembra, que llegó a la tela en busca de cópula. El macho se esforzó por apartarla, pero la hembra se mantuvo en sus intenciones; aquél hubo de copular con ella rápidamente, antes de volver con la primera (*debajo*)
Distribución: Java, Sumatra y Borneo.

4x



5. OFRENDANDO el cadáver de un rival, el macho de una viuda común (*Meta segmentata*) inicia el ritual de cortejo. Con frecuencia varios machos luchan por mantenerse situados en la tela de una hembra, con resultados fatales. El macho de la fotografía (*a la izquierda*) ha convertido a su víctima en moneda de cambio, usando el cuerpo envuelto en seda del perdedor como regalo nupcial para la hembra. Normalmente el macho habría esperado a que una mosca cayera en la tela.

Distribución: Europa, Asia templada y Canadá.



6. INSTALADO y sujeto con finos hilos de seda, el macho de la araña gigante *Nephila maculata* discurre por el dorso de la hembra. Aunque ésta suele ignorarlo, no es raro que lo expulse. Quizá para evitar tales interrupciones, los machos tienden a hilar seda mientras la hembra se alimenta. Los hilos, que son aplicados cerca de los receptores olfativos de la hembra, están saturados de feromonas y parece que transmiten un mensaje sexual.

Distribución: Sur de Asia hasta Japón, y norte de Australia.

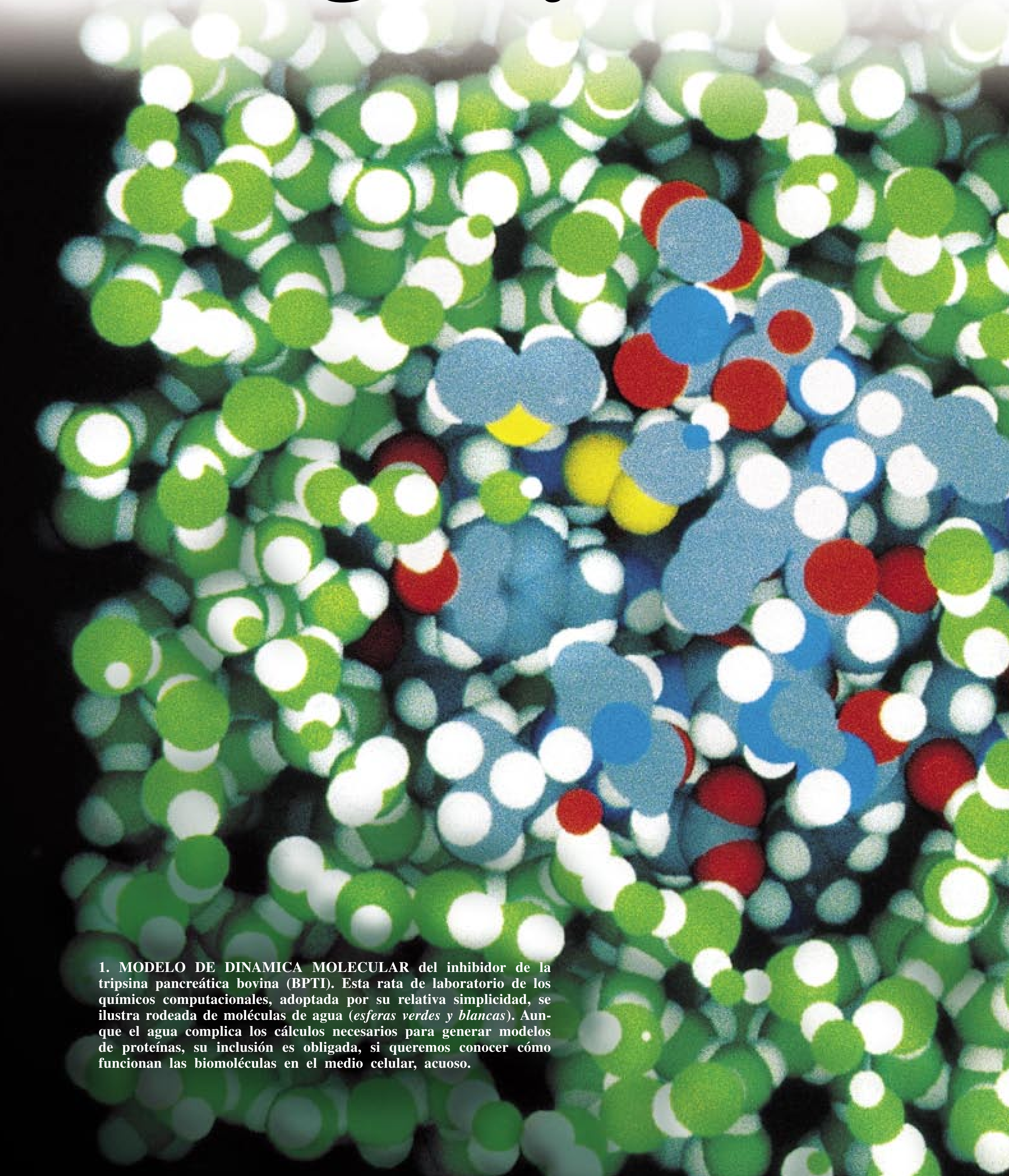
7. SUJETANDO SU PAREJA A UNA HOJA, el macho de una araña cangrejo europea (*Xysticus cristatus*) podrá deambular por la hembra, que es muy grande aunque cooperadora. Después, el macho se situará debajo de la hembra y copulará durante una hora, para marcharse a renglón seguido. La hembra es capaz de deshacerse de la sujeción con relativa facilidad, prueba de que las ataduras no representan un dispositivo de seguridad para el macho. Su finalidad se desconoce.

Distribución: Europa, Africa del norte y gran parte de Asia.



KEN PRESTON-MAFHAM y ROD PRESTON-MAFHAM son hermanos que comparten una misma vocación naturalista. Con su objetivo Ken ha fotografiado más de 3000 especies en más de 40 países. Autor o coautor de una veintena de libros, ha investigado el comportamiento de insectos y de arañas. Rod se doctoró en zoología por la Universidad de Londres. Ha escrito varios libros y ha preparado programas de historia natural para la radio de la BBC. Con su hermano y su esposa, Jean, gestiona la agencia de fotografías de historia natural Premaphotos Wildlife.

El agua y las mo



1. MODELO DE DINAMICA MOLECULAR del inhibidor de la tripsina pancreática bovina (BPTI). Esta rata de laboratorio de los químicos computacionales, adoptada por su relativa simplicidad, se ilustra rodeada de moléculas de agua (*esferas verdes y blancas*). Aunque el agua complica los cálculos necesarios para generar modelos de proteínas, su inclusión es obligada, si queremos conocer cómo funcionan las biomoléculas en el medio celular, acuoso.

léculas de la vida

La modelización mediante ordenador pone al descubierto la forma en que el agua condiciona la estructura y dinámica de las proteínas y otras biomoléculas

Mark Gerstein y Michael Levitt

El agua es barata, cuando no gratuita, en buena parte del mundo. Pero durante el verano de 1986, uno de los autores (Levitt) pagó medio millón de dólares por una gota que cabía en la punta de un alfiler. No es que ese mínimo valiera semejante precio. Con el dinero se pagaron dos semanas de trabajo de un superordenador especial, sin el cual no se habría podido elaborar un modelo capaz de explicar de qué modo el agua condiciona la estructura y el movimiento de una proteína particular.

La proteína en cuestión era el inhibidor de la tripsina pancreática bovina (BPTI, del inglés "bovine pancreatic trypsin inhibitor"), que se encuentra en el páncreas del ganado. El BPTI es una de las moléculas favoritas de los modelizadores por ordenador por su menguado tamaño, lo que facilita su investigación frente a las demás proteínas. El equipo de Martin Karplus, de la Universidad de Harvard, había obtenido un modelo en 1977, pero sólo en el vacío, es decir, sin que ninguna otra molécula interaccionara con el inhibidor. Nadie había representado el BPTI tal y como se encuentra en el interior celular, rodeado de miles de moléculas de agua.

Estuvo muy bien empleada la fortuna gastada. No sólo sirvió para que Levitt y Ruth Sharon, colaboradora suya, comprobaran que el modelo anterior del BPTI en el vacío no predecía adecuadamente el aspecto de la proteína ni su comportamiento en el mundo real, sino que tal descubrimiento contribuyó a preparar el camino para que otros químicos simularan las estructuras de nuevas moléculas biológicas en el medio acuoso natural.

Merced al progreso de la técnica informática, con un ordenador de sobremesa podemos ahora crear modelos del BPTI y proteínas similares en un par de días y 100 pesetas en gastos de energía eléctrica. Se han creado representaciones en entorno acuoso de más de cincuenta proteínas y ácidos nucleicos.

¿Por qué es tan importante conocer los efectos ejercidos por el agua sobre la forma de las biomoléculas? Por una razón poderosa: la estructura de una molécula anuncia su función, lo que ayuda a descifrar las interacciones bioquímicas que subyacen bajo los fenómenos vitales. En una vertiente aplicada, la comprensión de la estructura de las biomoléculas en el entorno acuoso allana el camino para la fabricación de nuevas medicinas que actúen mediante el bloqueo de una ruta bioquímica o a través de la potenciación de ésta.

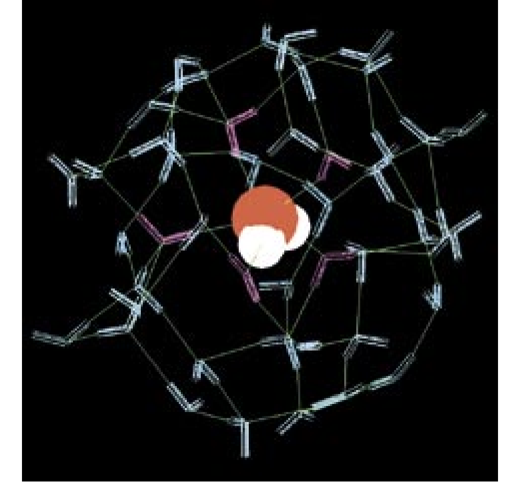
Para adentrarnos en el modo en que el agua condiciona la estructura de las biomoléculas, hemos de empezar por describir las propiedades distintivas del agua. Dichas notas características surgen de su propia estructura y de la forma en que esta estructura le permite "administrar" las cargas eléctricas de otras moléculas.

Una molécula solitaria de agua (H_2O) presenta geometría tetraédrica, con un átomo de oxígeno en el centro del tetraedro, dos átomos de hidrógeno en dos de los cuatro vértices y nubes de carga negativa en los otros dos. Las nubes de carga negativa son el resultado de la unión de las

estructuras atómicas de oxígeno e hidrógeno. De un modo muy simplificado, digamos que el oxígeno tiene ocho electrones, dotados de carga negativa, que giran en torno al núcleo, portador de carga positiva: dos electrones en una corteza interior y los seis restantes en la corteza exterior. La corteza interior admite sólo dos electrones; está, pues, completa. Pero la corteza exterior puede albergar hasta ocho. El hidrógeno posee un electrón. Cuando el oxígeno se combina con dos hidrógenos, atrae a sus electrones para completar la corteza exterior. Puesto que cada electrón del hidrógeno pasa más tiempo alrededor del átomo de oxígeno que en torno a su propio núcleo cargado positivamente, la molécula de agua es polar: tiene dos nubes con una ligera carga negativa alrededor del átomo de oxígeno, mientras que sus dos átomos de hidrógeno soportan cargas ligeramente positivas. Sin embargo, estos dos tipos de cargas se compensan entre sí y, en consecuencia, las moléculas de agua son eléctricamente neutras.

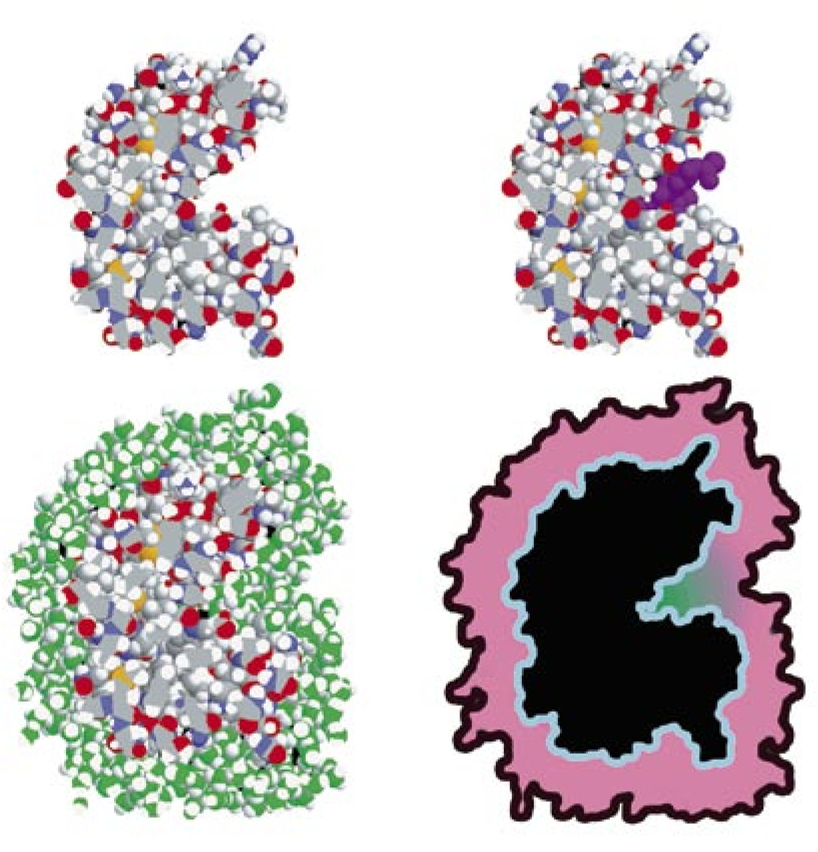
Los químicos no suelen representar las nubes de carga negativa alrededor del átomo de oxígeno de una molécula de agua; antes bien, acostumbran optar por figurar la molécula de agua en forma de V. Cada brazo de la V corresponde a un enlace oxígeno-hidrógeno con una longitud aproximada de 10^{-8} cm. El ángulo que generan las dos ramas de la V vale unos 105 grados, algo por debajo del ángulo de 109,5 grados que forman cualquier par de lados de un tetraedro perfecto.

Por mor de la polaridad de las moléculas de agua, se privilegian las interacciones entre un hidrógeno, dotado de carga positiva, de una molécula de agua y el oxígeno de otra, portador de carga negativa. Estas interacciones reciben el nombre de enlaces o puentes de hidrógeno. Reflejando la geometría tetraédrica del agua, cada molécula de agua líquida establece cuatro enlaces de hidrógeno: dos entre sus hidrógenos y los átomos de oxígeno de otras dos moléculas de agua, y dos entre su átomo de oxígeno y los hidrógenos de otras dos moléculas de agua. Mas, a diferencia de lo que ocurre en el agua helada, constituida por una red de moléculas dispuestas en una geometría tetraédrica perfecta, la estructura del agua líquida puede mostrarse caótica e irregular. El número real de enlaces de hidrógeno por molécula de agua líquida oscila entre tres y seis, con una media aproximada de 4,5. La necesidad de mantener una estructura tetraédrica sobre la base de enlaces de hidrógeno confiere al agua una estructura "abierta" y apenas compactada, si la comparamos con la estructura de la mayoría de otros líquidos, como los aceites o el nitrógeno licuado.



2. LOS PUENTES DE HIDROGENO dan al agua sus propiedades singulares. En este modelo de agua líquida, la molécula central (*una esfera roja y dos blancas*) ha tendido puentes de hidrógeno (*líneas verdes*) con otras cinco moléculas de agua (*en forma de V de color rosa*). Sus átomos de hidrógeno (*de color blanco*) están enlazados con los oxígenos de otras dos moléculas de agua; su átomo de oxígeno (*de color rojo*) está enlazado con un hidrógeno de cada una de otras tres moléculas de agua. Cada molécula de agua líquida suele establecer cuatro o cinco enlaces de hidrógeno.

Para construir un modelo informático del agua, se requiere introducir dos tipos de fuerzas, las intermoleculares y las intramoleculares. Las interacciones que acontecen *dentro* de una molécula de agua se modelizan en términos de corto alcance, fuerzas a modo de muelle creadas por los enlaces químicos entre los hidrógenos y el oxígeno de cada molécula. Las interacciones *entre* las moléculas de agua se modelizan en términos de fuerzas eléctricas, de largo alcance. Las fuerzas intramoleculares acotan dentro de ciertos valores las longitudes de los enlaces entre el oxígeno de cada molécula de agua



3. CENTRO ACTIVO de la lisozima. Es ésta una enzima que mata las bacterias al degradar los azúcares de las paredes celulares. El centro activo se halla en el surco principal de la proteína (*arriba, izquierda*). La forma del surco se adapta a la morfología de las moléculas que rompe (*esferas de color púrpura, arriba, derecha*). La modelización de la interacción entre agua y surco (*abajo, izquierda*) facilita la elaboración de un mapa del centro activo (*abajo, derecha*; *el sombreado verde indica las moléculas de agua fácilmente desplazadas*). Este tipo de mapas puede ser clave para el diseño de nuevos fármacos que bloqueen o potencien la actividad de una enzima.

MARK GERSTEIN y MICHAEL LEVITT vienen colaborando activamente desde hace años. Levitt enseña biología estructural en Stanford; Gerstein, en Yale.

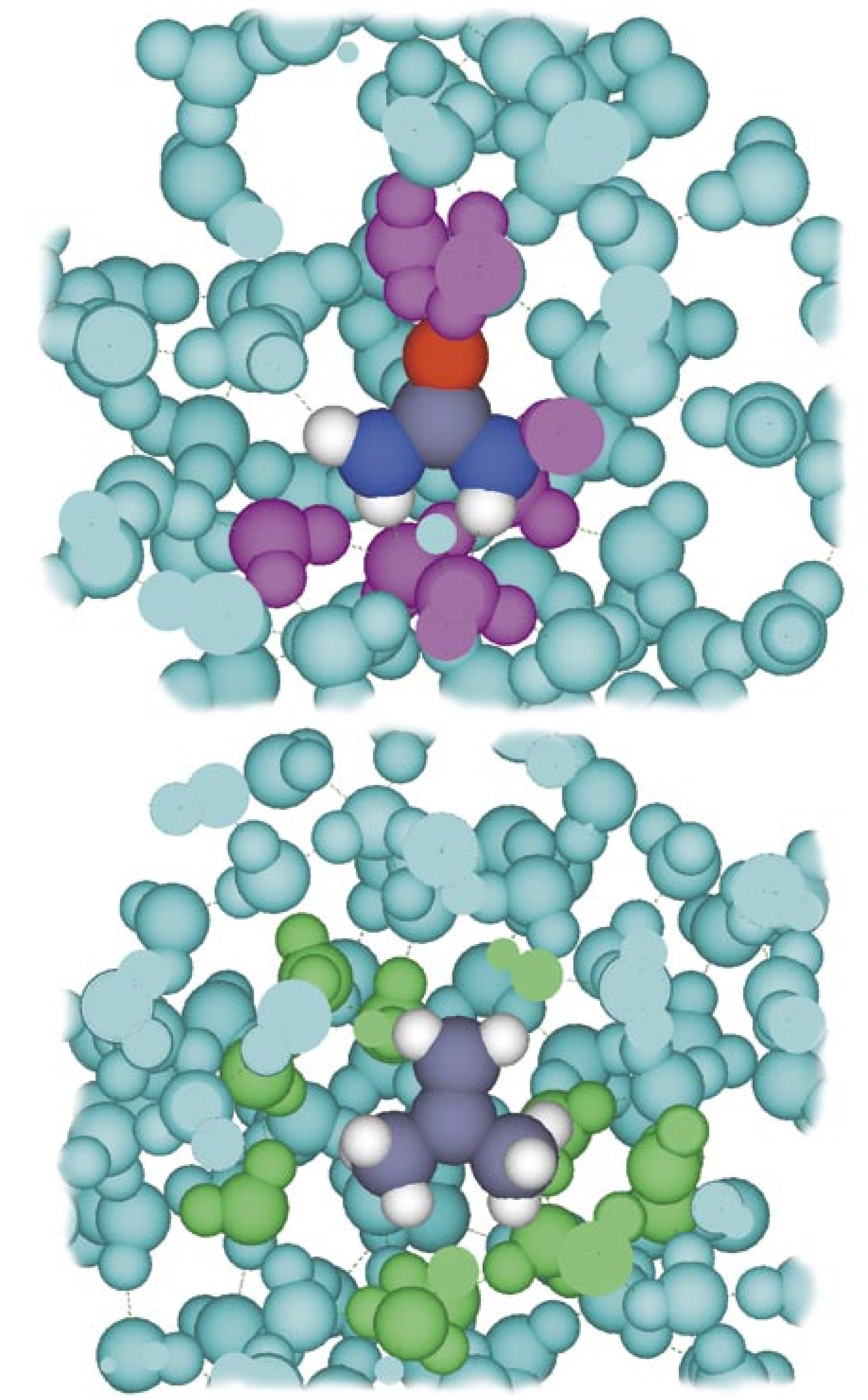
y sus hidrógenos, así como el ángulo formado entre cada uno de estos enlaces. Las fuerzas en cuestión recuerdan a los resortes; cuanto más distorsiona los enlaces una fuerza externa, tanto mayor resistencia oponen a esa fuerza los enlaces.

Las fuerzas intermoleculares de largo alcance ejercidas entre moléculas de agua desarrollan un comportamiento distinto del mostrado por las fuerzas intramoleculares; mengua su intensidad al crecer la distancia. Las fuerzas de largo alcance surgen, fundamentalmente, de la atracción entre cargas de signo opuesto y de la repulsión entre cargas del mismo signo. Estas fuerzas dan lugar a enlaces de hidrógeno y también a atracciones más débiles, las fuerzas de van der Waals.

Los primeros escarceos sobre simulación informática de moléculas de agua se remontan a las postrimerías de los años sesenta. Aneesur Rahman y Frank H. Stillinger, de los Laboratorios Bell, simularon el movimiento de 216 moléculas de agua en una caja rectangular. (Eligieron ese guarismo para su modelo porque es el número que encaja en un receptáculo de $6 \times 6 \times 6$ moléculas.) Duró su simulación cinco picosegundos, el máximo alcanzable por la técnica entonces disponible. Rahman y Stillinger observaron que el comportamiento del agua era una consecuencia directa de las relaciones entre las moléculas de agua. Esta simulación reprodujo, en expresión cuantitativa, muchas de las propiedades del agua, a saber, su estructura media, velocidad de difusión y calor de vaporización.

La importancia del agua en los procesos vitales deriva no sólo de su capacidad para establecer enlaces de hidrógeno con otras moléculas de agua, sino también de su capacidad para interaccionar con una amplia diversidad de biomoléculas. Por su naturaleza polar, el agua interacciona con otras moléculas polares (ácidos, sales, azúcares y las distintas regiones de proteínas y ADN). En razón de tales interacciones el agua puede disolver moléculas polares, por cuyo motivo se les aplica a éstas el calificativo de hidrófilas. No interacciona bien, por contra, con moléculas apolares como las grasas; cualquiera puede ver que no hay modo de mezclar agua y aceite. De las moléculas apolares se dice que son hidrófobas.

Las proteínas y el ADN comprenden zonas hidrófilas e hidrófobas distribuidas en largas cadenas. La respectiva estructura tridimensional de estas moléculas viene dictada por el plegamiento de las cadenas en configuraciones más compactas de suerte tal que los grupos hidrófilos aparezcan en la superficie, donde pue-



4. MOLECULAS de morfología casi idéntica. Interaccionan de manera diferente con moléculas de agua según sean polares, tengan cargas parciales en algunos de sus átomos, o carezcan de carga y sean, por tanto, apolares. La urea, una molécula polar presente en la orina, establece enlaces o puentes de hidrógeno con moléculas de agua (*esferas de color púrpura, arriba*). Por contra, el isobuteno apolar no engendra este tipo de enlaces; antes bien, las moléculas de agua tienden puentes de hidrógeno entre sí alrededor del isobuteno, desarrollando una estructura en forma de jaula (*esferas verdes, abajo*).

den interaccionar con el agua, y los grupos hidrófobos quedan encerrados en el interior, alejados del agua. En 1959, Walter Kauzmann propuso que ese efecto hidrófobo era crucial para el plegamiento de las proteínas. Y hoy sigue siendo tema de enorme interés el papel que desempeñe la hidrofobia en el plegamiento de las proteínas.

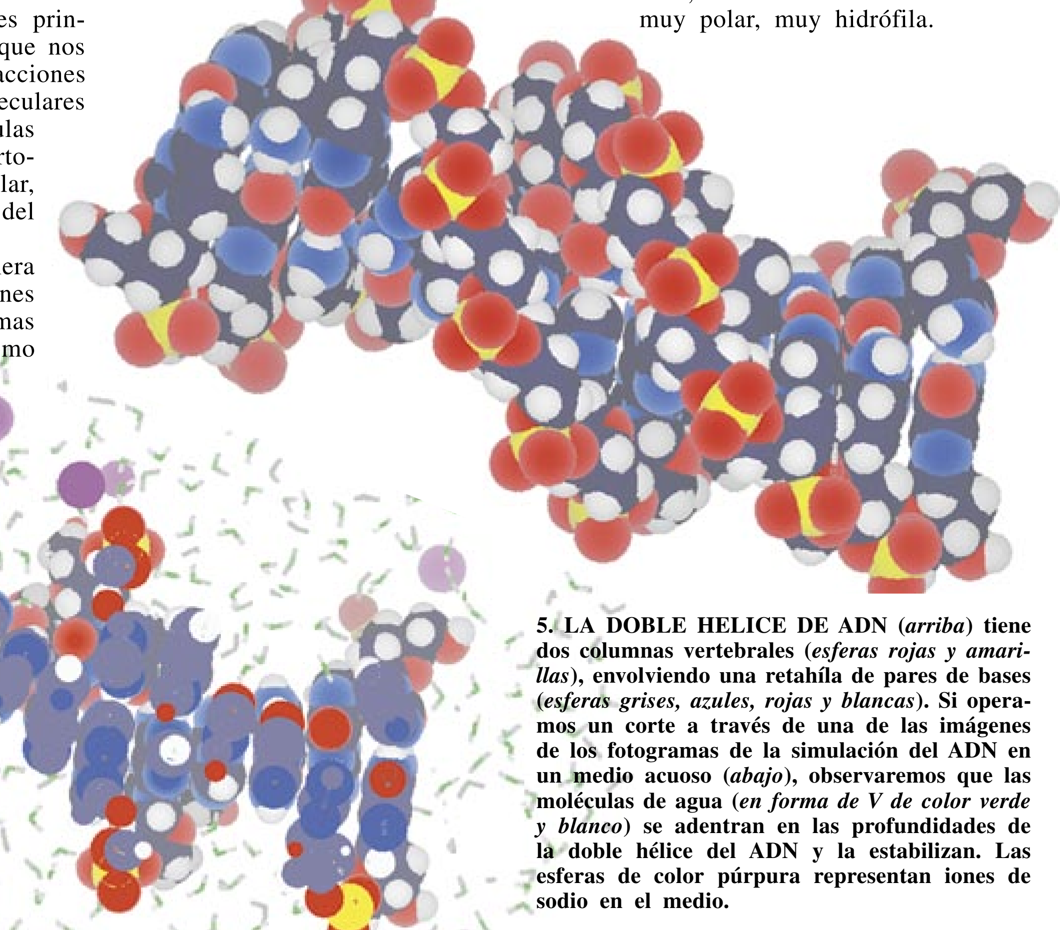
Existen tres tipos de agua que deben entrar en consideración al construir un modelo informático de una molécula en disolución acuosa: el "agua ordenada", que rodea e interacciona intensamente con la molécula, "el agua a granel", situada en zonas alejadas, y otra que queda escondida en el seno de la molécula. Hay en la célula miles de millones de moléculas de agua. Las células humanas son agua en su mayor parte. Aproximadamente el 60 por ciento del peso del cuerpo humano corresponde al agua.

¿Cómo construimos el modelo de estas moléculas de agua en asociación con los átomos de una biomolécula? Primero se describen las interacciones básicas entre todos los átomos; dejamos después que de ahí surja un sistema según las leyes de la física newtoniana. Una simulación de este tipo requiere dos ingredientes principales, a saber, un camino que nos permita describir las interacciones intramoleculares e intermoleculares entre el agua y las biomoléculas y un procedimiento para cartografiar la dinámica molecular, sus movimientos a lo largo del tiempo.

La dinámica molecular genera una secuencia de configuraciones que recuerda a los fotogramas de una película. Cada átomo se mueve a lo largo del tiempo en una serie de pasos discretos, o saltos temporales. Si ninguna fuerza actúa sobre el átomo, la distancia que recorra será una función de la velocidad que llevaba en su posición anterior, pues la distancia es igual a la velocidad multiplicada por el tiempo. Ahora bien, durante un salto temporal, las fuerzas ejercidas por otros átomos provocan la aceleración del átomo, su cambio de velocidad. Pero si las fuerzas persisten constantes durante el salto temporal, las leyes de Newton establecen que el cambio de velocidad sea proporcional a la fuerza, de modo que podamos obtener un cálculo de la velocidad actualizada. Con esa velocidad actualizada calcularemos la nueva posición del átomo. Los átomos de un líquido sometidos a intensas interacciones no pueden recorrer grandes distancias; es necesario usar un salto temporal corto: un femtosegundo (10^{-15} segundos). Durante dicho intervalo, la molécula apenas se desplaza un $^1/_{500}$ de su diámetro.

En una simulación prolongada, el cálculo de cada salto temporal de todos los átomos de una biomolécula con su agua ordenada genera una enorme cantidad de datos. Una proteína pequeña bañada en agua, por ejemplo, produce medio millón de conjuntos de coordenadas cartesianas en un nanosegundo; cada uno de esos conjuntos describe las posiciones de unos 10.000 átomos. La película que se obtiene con este tipo de simulaciones registra con suma nitidez numerosos detalles. En la serie de millones de fotogramas contemplamos el giro, la vibración y el desplazamiento de cada molécula de agua.

Ilustremos con dos moléculas orgánicas sencillas las posibilidades que encierra la simulación informática para filmar la manera en que el agua condiciona la dinámica molecular. Serán el isobuteno y la urea, de morfología similar aunque propiedades muy diferentes. El isobuteno, un hidrocarburo producido en las refinerías de petróleo, tiene forma de Y, es una molécula apolar (hidrófoba, por tanto) y consta de cuatro átomos de carbono, dos de ellos unidos por un doble enlace. La urea es un producto del metabolismo de proteínas que se segrega con la orina. También tiene forma de Y: un grupo carbonilo (C═O) unido a dos grupos amino (NH_2). A diferencia del isobuteno, la urea es una molécula muy polar, muy hidrófila.



5. LA DOBLE HELICE DE ADN (*arriba*) tiene dos columnas vertebrales (*esferas rojas y amarillas*), envolviendo una retahíla de pares de bases (*esferas grises, azules, rojas y blancas*). Si operamos un corte a través de una de las imágenes de los fotogramas de la simulación del ADN en un medio acuoso (*abajo*), observaremos que las moléculas de agua (*en forma de V de color verde y blanco*) se adentran en las profundidades de la doble hélice del ADN y la estabilizan. Las esferas de color púrpura representan iones de sodio en el medio.

6. LA HELICE ALFA, que se encuentra en la mayoría de las proteínas, puede desenroscarse fácilmente en el agua porque las moléculas de ésta reemplazan los enlaces de hidrógeno (*líneas verdes*) que normalmente mantienen la cohesión de la hélice. Se muestra una molécula de agua (*verde*) que establece un puente entre un oxígeno y un grupo NH (*azul*).

Cuando se simula la dinámica molecular de isobuteno y urea, se advierte que el agua se comporta de modo distinto en torno a uno u otra. Las moléculas de agua interaccionan directamente con la urea, estableciendo puentes de hidrógeno con los átomos de hidrógeno y oxígeno de la urea, así como entre sí mismos. Por contra, las moléculas de agua se alejan del isobuteno hidrófobo y establecen puentes de hidrógeno sólo entre ellas, tejiendo una jaula de moléculas de agua ordenada que rodean al isobuteno.

Merced a la representación de la interacción entre moléculas de agua y moléculas sencillas entendemos mejor el comportamiento que mantiene el agua con las proteínas y los ácidos nucleicos, biomoléculas más complejas. El agua se integra en la estructura del ADN. Los primeros intentos de idear modelos de la dinámica molecular del ADN en el vacío fracasaron; debióse a que las fuerzas de repulsión entre los grupos fosfato, dotados de carga negativa, que constituyen la columna vertebral de la doble hélice del ADN arruinaban la estructura al cabo de sólo 50 picosegundos. A finales de los años ochenta, Levitt y Miriam Hirshberg, del Instituto Nacional de Investigaciones Médicas de Londres, consiguieron un modelo que perduraba 500 picosegundos y en el que, junto al ADN, se habían incluido moléculas de agua que estabilizaban la estructura en doble hélice, al formar puentes de hidrógeno con los grupos fosfato. Otras simulaciones posteriores de ADN en agua han puesto de manifiesto la capacidad de las moléculas de agua para interaccionar con cualquier zona casi de la doble hélice, incluidos los pares de bases que constituyen la clave genética.

Pero el agua no puede adentrarse en las profundidades de la estructura de las proteínas, cuyas regiones hidrófobas están encerradas en el interior de un núcleo bastante ajustado. Ese es el motivo de que las simulaciones proteína-agua se centren en la superficie de las proteínas, que está mucho menos comprimida que su interior.

En virtud de la interacción entre moléculas de agua y superficie de las proteínas se desarrolla una geometría interesantísima, sobre todo en los surcos profundos de la superficie de las enzimas. Son éstas proteínas que catalizan las reacciones químicas de las células. Las moléculas de agua enlazadas por puentes de hidrógeno difícilmente encajan en los surcos y saltan a la primera para dejar el sitio a los ligandos, las moléculas con las que se pretende que la enzima interaccione; ese fenómeno podría explicar por qué los centros activos de las enzimas suelen hallarse en dichos surcos. La disposición de las moléculas de agua en un centro activo vacío imita la geometría y estructura propia del ligando, una información importante para los creadores de nuevos fármacos.

¿Qué parecido guardan las biomoléculas simuladas en su entorno acuoso con las que existen en la célula real? Carecemos de una respuesta concluyente. No existe ninguna técnica experimental que nos proporcione una información tan pormenorizada de las moléculas individuales y sus interacciones como la que nos ofrecen los modelos. Sí podemos integrar y promediar los valores de las diversas simulaciones con los resultados experimentales.

Para verificar la realidad de las estructuras de las biomoléculas simuladas recurrimos a la difracción de neutrones y de rayos X. En un experimento de difracción de neutrones, dirigimos un haz de neutrones sobre una muestra pequeña y registramos la difracción por las moléculas que constituyen la muestra. Cada espacio entre las moléculas actúa como una ranura diminuta, lo que crea un patrón de difracción característico. Al analizar estos patrones, se determina el intervalo entre las distintas moléculas. Cuando comparamos los resultados de la difracción de neutrones con las simulaciones por ordenador, en promedio las distancias mencionadas coinciden.

Para confirmar la dinámica de una simulación molecular, comparamos el comportamiento de la biomolécula simulada con las propiedades de la misma observadas en el laboratorio. La mayoría de las proteínas contiene al menos una hélice alfa, zona donde los aminoácidos componentes se enrollan y crean una especie de muelle. Por experiencia sabemos que el calor deshace el arrollamiento de hélices alfa; sin embargo, en los primeros intentos de simulación de una hélice alfa sencilla en el vacío a temperaturas elevadas, la hélice permanecía intacta. Sólo después de añadir agua en la simulación lograron Levitt y Valerie Daggett, de la Universidad de Washington, imitar el comportamiento de una hélice alfa real.

Las simulaciones por ordenador aportan una información cada vez más rica sobre la estructura y función orgánica de las biomoléculas. Ello supone, sin embargo, mantener una permanente batalla con las limitaciones técnicas de la computación y el coste del tiempo de los superordenadores en el empeño por simular biomoléculas cada vez más complejas en su ambiente acuoso.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

WATER: NOW YOU SEE IT, NOW YOU DON'T. Michael Levitt y Britt H. Park en *Structure*, vol.1, n.º 4, págs. 223-226; 15 de diciembre de 1993.

PACKING AT THE PROTEIN-WATER INTERFACE. Mark Gerstein y Cyrus Chothia en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 93, n.º 19, págs. 10167-10172; 17 de septiembre de 1996.

Para la consulta de los archivos electrónicos de estructuras moleculares, visite bioinfo.mbb.yale.edu y hyper.stanford.edu en Internet.

Un siglo de memorias magnéticas

Los inicios de la grabación en medios magnéticos, hoy tan extendida, no fueron muy prometedores. Sus bases científicas no estaban muy claras, las utilizaciones prácticas se hicieron esperar y empresarios y políticos contribuyeron a dificultar los avances

James D. Livingston

Gran parte de nuestra información se almacena en imanes: disquetes, cintas de audio y vídeo, grabaciones de contestadores automáticos, tarjetas de crédito... Todos estos sistemas retienen palabras, números, imágenes y sonidos como combinaciones de polos norte y sur, para lo que utilizan las técnicas de grabación magnética, cuyo centenario se celebra ahora.

Las memorias magnéticas han tenido una gran repercusión social en los últimos tiempos. Las cintas del caso Watergate obligaron a dimitir a Richard Nixon, presidente de los Estados Unidos en los años setenta, y otras grabaciones parecidas mantienen en la cuerda floja al actual presidente, Bill Clinton.

Las memorias magnéticas de los ordenadores gestionan discretamente desde hace tiempo los movimientos de personas, bienes y capitales. Son los auténticos almacenes electrónicos de la era de la información, repletos de datos científicos, médicos, industriales y financieros. Aunque también se usen otras bases, como son las películas fotográficas, el papel o los medios ópticos, el soporte magnético tiene sobre todos ellos la ventaja de que permite borrar y grabar la información fácilmente.

La grabación magnética, descubierta hace un siglo, languideció, empero, durante buena parte de él. Se ignoraban muchas cosas sobre los principios físicos subyacentes, no



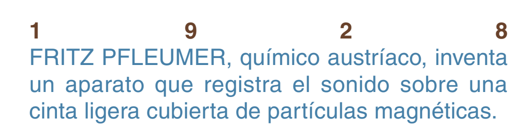
1898
VALDEMAR POULSEN, un ingeniero danés, inventa el telegráfono (*arriba*), un aparato que registra magnéticamente la voz humana sobre cables o cintas de acero.



1915
EL *LUSITANIA* es hundido por un submarino alemán, lo que refuerza las sospechas de que los alemanes usan telegráfonos para grabar mensajes transmitidos a frecuencias inaudibles.



1900
FRANCISCO JOSE, emperador de Austria, graba su voz durante su visita a la Exposición Universal de París, donde el telegráfono causa sensación.



1928
FRITZ PFLEUMER, químico austríaco, inventa un aparato que registra el sonido sobre una cinta ligera cubierta de partículas magnéticas.

JAMES D. LIVINGSTON es profesor en el departamento de ciencia de materiales e ingeniería del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Es autor de los libros *Driving Force: The Natural Magic of Magnets* (Harvard University Press, 1996) y *Electronic Properties of Engineering Materials* (John Wiley & Sons, diciembre de 1998). Livingston, que se doctoró en física aplicada por la Universidad de Harvard, es miembro de la Academia Nacional de Ingeniería, de la Sociedad Americana de Física y de ASM International.

tenía aplicaciones viables y encontró todo tipo de obstáculos políticos y empresariales, a pesar de lo cual se ha vuelto socialmente imprescindible en los últimos cincuenta años.

Las primeras memorias magnéticas

Hace muchísimo tiempo que se sabe que ciertos materiales "recuerdan" la dirección en que fueron imantados. Los magos de la corte del emperador de China ya hacían brújulas con imanes naturales en el siglo II a.C. Al descubrirse en el siglo XIX la relación entre electricidad y magnetismo fue cuando los imanes pasaron a tener un papel destacado en inventos como el telégrafo y el teléfono, los generadores eléctricos, los transformadores y los motores. Y a finales de ese mismo siglo se grabó la voz humana sobre un material magnético mediante un aparato llamado telegráfono, patentado en 1898 por el ingeniero danés Valdemar Poulsen.

Poulsen trabajaba para la Compañía Telefónica danesa y pensó que a la gente le gustaría grabar mensajes telefónicos. Mostró a sus amigos los rudimentos de su invento mediante un cable de acero tenso que atravesaba su laboratorio. Dispuso un micrófono telefónico conectado a un electroimán y deslizó el electroimán por el cable mientras hablaba ante el micrófono. El micrófono convertía la voz en una señal eléctrica, que el electroimán transformaba en un campo magnético que variaba con el timbre y el tono de la voz. Este campo magnético variable quedaba grabado sobre el acero.

Una vez finalizado el cable, Poulsen volvía a su inicio y sustituía el micrófono por un auricular. Una nueva pasada del electroimán por el cable permitía que el aparato funcionase a la inversa. La inducción electromagnética hacía que el campo magnético grabado en el cable fuese convertido por el electroimán en una señal eléctrica, que el auricular transformaba en sonido, permitiendo que la voz del inventor volviese a oírse débilmente.

Poulsen perfeccionó su invento (enrollando el cable en torno a un cilindro, entre otras cosas) y solicitó patentes en varios países. La respuesta fue invariablemente negativa. Un examinador de patentes norteamericano escribió que el telegráfono no funcionaría porque contradecía "todas las leyes conocidas del magnetismo". Está claro que no *todas* las leyes del magnetismo se conocían por aquella época, pues el invento de Poulsen sí funcionaba. El aparato se exhibió con éxito por toda Europa, causando sensación en la Exposición Universal celebrada en París en 1900. Entre los que lo probaron se hallaba el emperador Francisco José de Austria, a quien se debe la grabación magnética más antigua que se conoce.

Poulsen no fue indudablemente el primero que grabó y reprodujo la voz humana. Hacía más de veinte años que Thomas Edison había patentado el fonógrafo, que grababa los sonidos en forma de surcos sobre una lámina de estaño enrollada en un cilindro; luego se usarían cilindros de cera y más tarde discos de plástico. El fonógrafo era ya un producto consolidado cuando Poulsen presentó en público su invento, pero éste tenía ciertas ventajas técnicas sobre aquél. En un artículo aparecido en *Scientific American* en 1900 se afirmaba que el telegráfono producía un sonido "muy claro y completamente libre de los desagradables ruidos que se suelen oír en el fonógrafo". Pero habría de pasar medio siglo antes de que la grabación magnética se volviese de aplicación general.



1933
ADOLF HITLER se convierte en canciller de Alemania. La Gestapo adquiere muchas grabadoras magnéticas para su uso en interrogatorios.

AÑOS TREINTA
EL BLATTNERPHONE es el sistema de grabación magnética que utiliza la BBC para retransmitir programas grabados. Se necesitan dos personas para cambiar un rollo de cinta de acero.



1936
LA ORQUESTA FILARMONICA DE LONDRES graba un concierto en Ludwigshafen (Alemania). La grabación, que todavía se conserva, se hace con un magnetofón equipado con una cinta de plástico recubierta de óxido de hierro.

Inicios titubeantes

¿Qué fue lo que impidió el desarrollo de un invento tan prometedor? Los historiadores le echan la culpa a una combinación de factores empresariales y técnicos. La American Telephone & Telegraph Company (AT&T) se opuso inicialmente al telegráfono, al estimar que el volumen de negocio disminuiría en un tercio si los clientes pensaban que se podían grabar sus conversaciones. La revista *Technical World* publicó en 1906 un artículo titulado "El testimonio de un cable de acero", en el que dos hombres de negocios de ficción, Jones y Brown, discutían sobre el contenido de una conversación telefónica que habían mantenido. En medio de la discusión, Jones sacaba un carrete de hilo de acero que insertaba en el telegráfono y demostraba que Brown no tenía razón.

Debido al temor a la pérdida de intimidad, la primera patente de grabación magnética concedida en los Estados Unidos concierne a las máquinas de dictado que fabricaba la American Telegraphone Company, fundada en 1903. Pero los sistemas fonográficos de la competencia, como el edífono y el dictáfono, les llevaban veinte años de ventaja y eran más baratos, más fiables y de uso más sencillo.

El desarrollo del telegráfono tropezó también con la deficiente comprensión de los principios físicos en que se basaba. La conversión del sonido en electricidad y luego en un campo magnético no presentaba grandes secretos, gracias a la experiencia que se tenía del teléfono, pero no se podía decir lo mismo del mecanismo que permitiese registrar la historia de tal campo magnético en un medio estable, como lo es un cable de acero. Otro problema que había era el bajo volumen con el que se reproducía el sonido grabado.

Pero el mayor problema de American Telegraphone no era de carácter técnico. Algunos de los escasos telegráfonos vendidos se instalaron en las estaciones de radio de Tuckerton (Nueva Jersey) y Sayville (Nueva York), operadas por la empresa alemana Telefunken y por una compañía estadounidense con participación alemana, respectivamente. La Armada alemana había dotado también a sus submarinos de telegráfonos.

Al estallar la Primera Guerra Mundial cundió la sospecha de que estas emisoras transmitían información militar a los submarinos alemanes que operaban en el Atlántico. Una de las acusaciones era que se usaban telegráfonos para grabar mensajes secretos, que luego se transmitían por radio a una velocidad que los hacía inaudibles. La señal de radio era grabada por el telegráfono del submarino y reproducida a la velocidad de audición. Las sospechas aumentaron cuando un radioaficionado de Nueva Jersey descubrió que el zumbido que captaba por las noches constaba en realidad de una rápida sucesión de caracteres en código Morse cuando se reproducía a menor velocidad.

El gobierno norteamericano confiscó la estación de Tuckerton en 1914 y la de Sayville poco después, tras el hundimiento del transatlántico británico *Lusitania* en las costas de Irlanda por un submarino. La Armada estadounidense había adquirido 14 telegráfonos, que no acabaron de funcionar. Se formularon cargos de traición contra American Telegraphone, que además padecía una pésima gestión y no había conseguido vender más que unas cien máquinas de dictado. La empresa se declaró en quiebra y el desarrollo comercial de la grabación magnética se estancó durante dos decenios en los Estados Unidos.

La situación en Europa

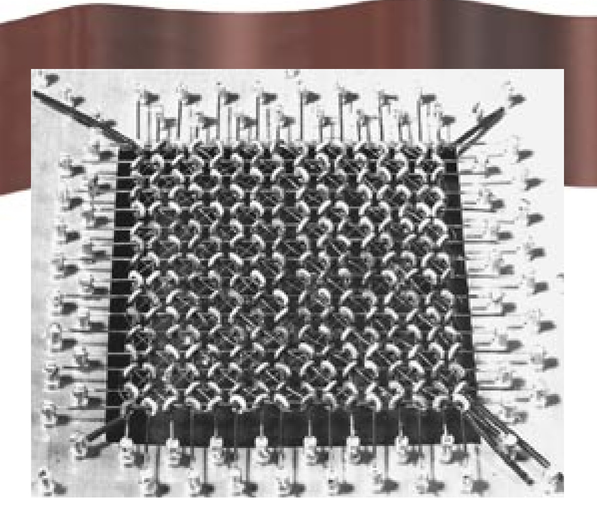
La grabación magnética tuvo mejor suerte en Europa. En los años veinte se solucionó el problema del volumen de reproducción mediante el uso de amplificadores electrónicos. El inventor alemán Kurt Stille consiguió alargar el tiempo de grabación modificando los telegráfonos. Stille (que en alemán significa, irónicamente, "silencio") solía acabar sus conferencias sacando del bolsillo un cilindro de acero de 20 centímetros de largo y afirmando que podía grabar en él una sinfonía entera.

Una de las compañías que trabajaron con licencia de Stille fue la Ludwig Blattner Picture Company de Gran Bretaña, que fabricó una

1947
BING CROSBY emite el primer programa de radio grabado que alcanza grandes audiencias en los Estados Unidos.



1952
MEMORIA DE NUCLEOS del ordenador Whirlwind I, capaz de almacenar 256 bits de información.



AÑOS CINCUENTA
EL DISCO DURO es comercializado por IBM en 1957 para almacenar magnéticamente la información de los ordenadores. La imagen abarca un conjunto de 50 discos que tenía una capacidad total de 56 megabytes.

grabadora magnética llamada Blattnerphone. Pensado para el cine sonoro, el aparato tuvo en las cada vez más numerosas emisoras de radio su cliente principal. La BBC (British Broadcasting Company) lo adoptó en 1931 para reemitir programas, utilizarlo en los ensayos y conservar las retransmisiones más importantes.

El Blattnerphone era una máquina imponente por sus dimensiones (metro y medio de alto, otro tanto de ancho y más de medio metro de fondo) y por su peso, cercano a la tonelada. Grababa sobre una cinta de acero de tres milímetros de ancho, que cruzaba los cabezales a una velocidad de un metro por segundo. Una grabación de media hora requería un kilómetro y medio de cinta.

Pero la máquina tenía sus ventajas. Mientras que la modificación de los registros fonográficos exigía una nueva grabación, aquí se podía cortar y soldar la cinta con cierta facilidad. Pese a que las soldaduras se rompían con frecuencia creando situaciones de peligro, la máquina funcionaba satisfactoriamente y se siguió usando en varios países hasta 1945.

Stille y sus colaboradores habían diseñado y comercializado en Alemania en 1925 un aparato que combinaba una máquina de dictado y una grabadora telefónica. A diferencia de AT&T, varias compañías de teléfono europeas autorizaron la conexión de grabadoras magnéticas a las líneas. Pero el mercado de las máquinas de dictado era muy limitado en Alemania, donde la crisis económica favorecía la contratación de taquígrafos con salarios muy bajos.

La empresa Lorenz lanzó al mercado su propia versión del aparato de Stille en 1933. Fue el año en que Hitler se hizo con el poder y la Gestapo adquirió gran cantidad de tales aparatos para grabar interrogatorios y conversaciones telefónicas. Lorenz desarrolló también una grabadora de cinta de acero para la Radio Nacional Alemana, que, como la BBC, empezaba a retransmitir programas grabados magnéticamente. Al otro lado del Atlántico, las emisoras estadounidenses seguían emitiendo tan sólo programas en directo.

Las primeras grabadoras magnéticas se impusieron en Europa a pesar de que presentaban un serio inconveniente: precisaban larguísimas cintas de pesado acero. Hoy sabemos que el acero no es el mejor medio para grabar. La técnica de grabación magnética dio un paso decisivo en 1927 gracias al químico austríaco Fritz Pfleumer, quien puso a punto una cinta de papel cubierta de una capa de partículas magnéticas. Tal posibilidad ya la había indicado el ingeniero americano Oberlin Smith, en un artículo aparecido en 1888, artículo en el que se proponía también la grabación magnética. Pero sus ideas no cuajaron, lo que convirtió a Poulsen en el inventor del primer sistema de grabación magnética.

Pfleumer había desarrollado una técnica para fabricar papel dorado

ELECTROIMAN
BOBINA ATRAVESADA POR UNA SEÑAL MAGNETICA
MEDIO MAGNETICO
CAMPO MAGNETICO
CAMPO MAGNETICO REGISTRADO

LA GRABACION MAGNETICA permite almacenar datos informáticos, de audio y de vídeo. La información se convierte primero en una señal eléctrica, que pasa a través de la bobina de un electroimán. El campo magnético variable resultante (*en rojo*) es registrado sobre un medio magnético que se mueve respecto al electroimán. Si la señal eléctrica es una onda sinusoidal, la magnetización tendrá también cierto aspecto sinusoidal.



1956
VR-1000, el prototipo del primer reproductor de vídeo comercial, en el momento de su presentación por Ampex. El aparato, grande y complejo, usaba una cinta de 5 cm de ancho.



1959
SURGE UNA DISCUSIÓN inesperada entre Nikita Khruschev, primer ministro soviético, y Richard Nixon durante su visita a una exposición de electrodomésticos en Moscú. El incidente quedará grabado en vídeo y se hará famoso con el nombre de “debate de la cocina”.

LORAN 90

1963
LA CASETE COMPACTA es introducida por Philips. Le seguirán la cinta de ocho pistas y la microcasete.

(utilizado en las boquillas de los cigarrillos) dispersando pequeñas partículas de bronce en pegamento y aplicando la mezcla sobre una hoja de papel. Al darse cuenta de que podía utilizar el mismo procedimiento para cubrir una tira de papel con partículas de acero, en 1928 fabricó una grabadora magnética que las utilizaba. El aparato tenía un mecanismo de arrastre simplificado que conducía la nueva cinta, mucho más ligera, a través de un nuevo tipo de cabezal magnético. El invento era tan prometedor que en 1932 la firma eléctrica AEG compró todas las patentes de Pfleumer.

AEG colaboró con el consorcio químico I. G. Farben (hoy BASF) en la investigación de las distintas clases de partículas magnéticas con las que se podían cubrir varios tipos de cinta. Los mejores resultados se obtuvieron al aplicar una capa de óxido de hierro sobre una cinta de plástico. Estas investigaciones desembocaron en el "Magnetophon", que fue presentado al público en 1935 con motivo de la Exposición de Radio de Berlín. En noviembre de 1936 se grabó en magnetofón un concierto de la Orquesta Filarmónica de Londres en Ludwigshafen (Alemania), grabación que aún se conserva. Gracias a la polarización por corriente alterna, que mejora la calidad del sonido superponiendo a la grabación una señal eléctrica de alta frecuencia, el magnetofón desplazó a todos sus rivales. Este aparato es el antecesor directo de la moderna grabadora magnética.

Ante tales éxitos foráneos, AT&T se decidió a investigar la grabación magnética. Aunque todavía tardaría en lanzar un producto al mercado, estas investigaciones le permitieron fabricar grabadoras magnéticas para el ejército norteamericano durante la Segunda Guerra Mundial, con la colaboración de empresas como la Brush Development Corporation (que contaba con Semi Begun, un ingeniero que había trabajado con Stille antes de abandonar la Alemania nazi en 1935), la Armour Research Foundation (con la participación del ingeniero norteamericano Marvin Camras) y General Electric, licenciataria de Armour. Estas compañías fabricaron miles de grabadoras magnéticas para el ejército, con las que se registraron mensajes en barcos, aviones y campos de batalla.

Los especialistas británicos y estadounidenses que espiaban las transmisiones nazis se daban cuenta, sin embargo, de la superioridad del sistema alemán. Los aliados no descubrieron el magnetofón hasta los últimos meses de la guerra en Europa. Cuando las tropas estadounidenses ocuparon los estudios de Radio Luxemburgo hallaron un magnetofón que contenía una de las últimas arengas de Hitler, grabada sobre un versión mejorada de las cintas de Pfleumer. Algunos de los aparatos confiscados fueron enviados a los Estados Unidos, donde contribuyeron al auge de la grabación magnética durante la posguerra.

Uno de los militares que se había hecho con un magnetófono era Jack Mullin, quien se lo mostró a Bing Crosby en 1947. El popular cantante hacía un programa para la cadena NBC, pero no le gustaban las limitaciones del directo. Como la NBC no emitía programas grabados, Crosby se pasó a la ABC, pero las grabaciones sobre discos fonográficos de $33\,^{1}/_{3}$ r.p.m. dejaban mucho que desear. Crosby quedó prendado del magnetofón y su programa se convirtió en el primero grabado que alcanzó grandes audiencias en los Estados Unidos.

Los Estados Unidos recuperan terreno

Mullin utilizó los aparatos y las cintas que había obtenido en Alemania durante mucho tiempo. Pero la compañía Ampex sacó al mercado una versión mejorada del magnetofón en 1948 y pronto hubo diversos competidores. Firmas como 3M desarrollaban entre tanto nuevas cintas. Las cintas tardaron pocos años en desplazar a los cables de acero como soporte de grabación y los programas de radio grabados se hicieron cada vez más habitua-



1974
RICHARD NIXON dimite como presidente de los Estados Unidos cuando unas cintas grabadas en el Despacho Oval revelan su participación en el escándalo Watergate.

1991
LA BRUTALIDAD POLICIAL norteamericana queda al descubierto con la difusión del vídeo que muestra el apaleamiento de Rodney King.

1971
EL DISCO FLEXIBLE de ocho pulgadas hace su aparición. Le seguirán los de 5,25 pulgadas (*izquierda*) y 3,5 pulgadas.

1998
MONICA LEWINSKY protagoniza un nuevo escándalo presidencial, del que se conocen muchos detalles gracias a la grabación de conversaciones telefónicas.

les. La facilidad con que se podían montar las grabaciones hizo que se introdujeran innovaciones, como la combinación de varias tomas de la misma canción para obtener una versión aceptable, el acompañamiento con murmullos de la audiencia o la supresión de sonidos indeseables, como la tos de Crosby tras decir “Si le gusta fumar,” en un anuncio de cigarrillos.

Camras fue uno de los promotores de la banda sonora magnética en las películas. Desde la aparición del cine sonoro se usaba un sistema óptico que convertía el sonido en una señal luminosa de intensidad variable, que se registraba en la película. La grabación magnética simplificaba enormemente el montaje de diálogos, música y efectos sonoros, por lo que la técnica se impuso rápidamente. El sonido de la mayoría de las producciones de Hollywood se grababa magnéticamente en 1951, aunque muchas de las copias distribuidas tuviesen bandas sonoras ópticas.

También la televisión, que en 1949 ya consumía más película que Hollywood, adoptó rápidamente el sonido magnético en los años de posguerra. Es más, se vislumbraban técnicas gemelas ideales para la televisión, la grabación magnética de imágenes o *vídeo*. Pero antes tenía que superarse un gran obstáculo.

Las grabaciones de audio requieren la reproducción de señales de frecuencia inferior a 20.000 ciclos por segundo, que es la máxima frecuencia perceptible por el oído humano. Las señales de vídeo, en cambio, tienen que transmitir muchos más datos. Para crear la ilusión de un movimiento continuo, la televisión norteamericana utiliza 30 imágenes por segundo (en la mayor parte de Europa y del resto del mundo se usan 25), cada una de las cuales contiene centenares de líneas horizontales que constan a su vez de centenares de puntos.

En lugar de acelerar la velocidad de la cinta, los ingenieros de vídeo montaron ingeniosamente un cabezal rotatorio que permitía aumentar el movimiento *relativo* entre el cabezal y la cinta. Gracias a este mecanismo, Ampex presentó el primer vídeo comercial en 1956. Las emisiones grabadas son tan comunes en la televisión actual que los pocos programas que se emiten en directo sacan el máximo partido de ello.

Pero la influencia de la Segunda Guerra Mundial sobre la grabación magnética fue mucho más allá de sus usos en los espectáculos y las comunicaciones. El esfuerzo de guerra americano aceleró el desarrollo de los ordenadores electrónicos digitales. Una de estas máquinas, el Whirlwind I, creada en el Instituto de Tecnología de Massachusetts en los años cuarenta y cincuenta, tenía una “memoria de núcleos” formada por un enrejado de imanes de ferrita. Estos imanes, de forma toroidal, podían ser magnetizados en sentido horario o antihorario, representando un cero o un uno del sistema binario. Otras memorias magnéticas de ordenador han utilizado las cintas (como el UNIVAC 1, el primer ordenador comercializado en los Estados Unidos, que las usaba en su memoria auxiliar), tambores (cilindros magnetizados con bandas alrededor de su circunferencia) y discos (tanto duros como blandos).

Los circuitos integrados sustituyeron a las memorias de núcleos en los años setenta, pero los discos duros magnéticos continúan siendo la principal forma de almacenamiento de la información en un ordenador. Su capacidad ha aumentado considerablemente en los últimos años. Las capas superficiales de partículas de óxido de hierro han cedido el paso a finas películas de aleaciones ricas en cobalto, que son más magnéticas que los óxidos. Para leer los discos ya no se usa la inducción electromagnética, sino la magnetorresistencia, que detecta el campo magnético de un disco a través de la variación en la resistencia eléctrica de la cabeza lectora [*véase* “Almacenamiento de datos para computación avanzada”, por Mark H. Kryder, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre 1987]. Por todo ello, a pesar de la competencia creciente de sistemas ópticos basados en el láser, como el CD-ROM, la grabación magnética (que incluye un híbrido denominado grabación magneto-óptica) es aún la técnica más importante de almacenamiento de información electrónica.

Desde los años cincuenta no han dejado de aparecer nuevos productos de consumo que utilizan la grabación magnética. En 1963 Philips presentó la casete de audio compacta, cuyas ventas superarían a las de los discos de vinilo en una veintena de años. El vídeo doméstico apareció en los años setenta y hoy en día muchas películas recaudan más a través del alquiler de vídeos que en las salas de proyección. Las ventas de cámaras de vídeo (un producto de los ochenta) y el uso de la codificación magnética en tarjetas de crédito y de identificación han crecido espectacularmente. Son muchos los hogares que disponen actualmente de contestadores telefónicos automáticos, precisamente el propósito que motivó la invención de Poulsen hace cien años.

Grabar o no grabar

La posibilidad de que se graben actuaciones y conversaciones sin que sus protagonistas se den cuenta plantea, sin embargo, problemas éticos. Para bien o para mal, la memoria de un conjunto de partículas magnéticas es mucho más objetiva y fiable que la del cerebro humano, que depende de un mecanismo electroquímico subjetivo y a veces errático.

Desde el punto de vista ético, toda grabación debería equidistar entre la búsqueda de la verdad y el derecho a la intimidad. Si bien se ha cuestionado el uso de cámaras o de grabadoras ocultas, no es menos cierto que las imágenes de vídeo con el apaleamiento de Rodney King destaparon el tema de la brutalidad policial en los Estados Unidos. Las cámaras de vídeo han revelado también abusos realizados en hospitales. El equipamiento de vídeo de las instituciones bancarias y las grabaciones autorizadas por el juez han contribuido a la resolución de muchas causas, mientras que las grabaciones contenidas en las cajas negras han permitido esclarecer las causas de numerosos accidentes de aviación.

Puede decirse que el invento de Poulsen ha hecho más bien que mal en términos generales. El uso de materiales magnéticos para almacenar datos, imágenes y sonido es una técnica imprescindible para nuestra sociedad. Poulsen no pudo imaginar hace un siglo las consecuencias que traería su invención. Hoy necesitaríamos una grabación magnética para recordarlas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MAGNETIC RECORDING. S. J. Begun. Murray Hill Books, 1949.

MAGNETIC RECORDING HANDBOOK. Marvin Camras. Van Nostrand Reinhold, 1988.

MAGNETIC RECORDING: THE FIRST 100 YEARS. Dirigido por Eric D. Daniel, C. Denis Mee y Mark H. Clark. IEEE Press, 1999.

Plantas transgénicas

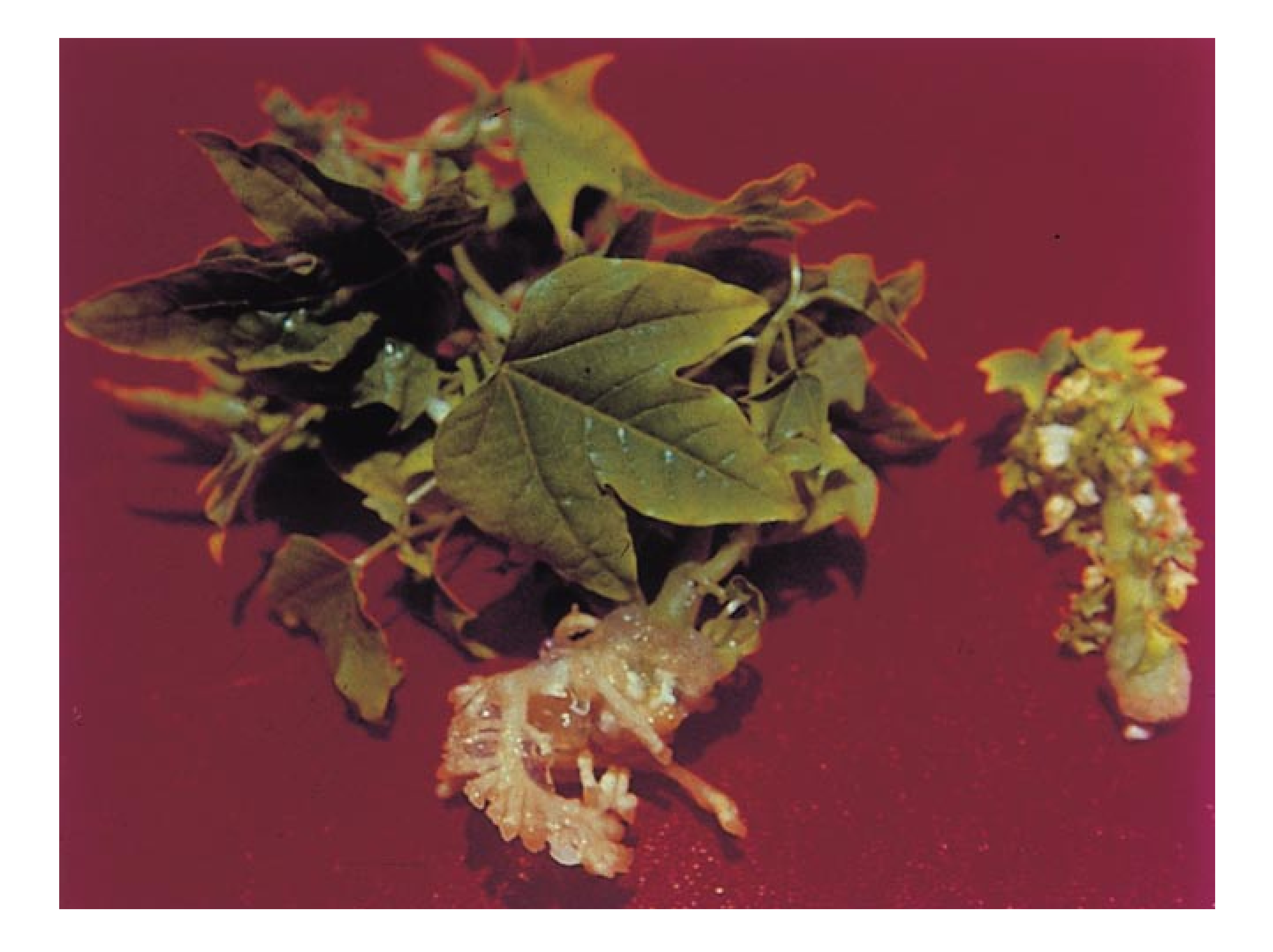
Con el desarrollo y mejora de plantas transgénicas los biólogos moleculares responden al reto de satisfacer la creciente demanda de alimentos en un mundo cada vez más poblado y contaminado

M.ª Fernanda Nieto-Jacobo, Arturo Guevara-García y Luis Herrera-Estrella

La permanente necesidad de satisfacer la demanda de alimento, vestido y materias primas ha sido la causa de que, desde la aparición de la agricultura, se cultivaran y seleccionaran las plantas de interés. El hombre buscaba en esa mejora vegetal obtener variedades que ofrecieran mayor rendimiento, calidad nutritiva, facilidad de cultivo y resistencia a agentes bióticos o abióticos.

El fitomejoramiento actual hunde sus raíces en los experimentos realizados en el siglo XIX por Gregorio Mendel, en los que concluyó que los caracteres de los organismos vienen determinados por factores discretos heredables (genes). Negaba que fueran resultado, como se creía hasta entonces, de la mezcla azarosa de las cualidades de los progenitores.

Así comenzó el método tradicional de producción de cultivares mejorados mediante cruzamientos dirigidos entre individuos, de la misma especie o de especies emparentadas. Los individuos sobresalientes (híbridos) se seleccionan, en ciclos subsecuentes de cultivo, hasta que después de numerosas tandas de cruzamientos y retrocruzamientos, aunadas a laboriosas pruebas de campo, se obtiene una generación portadora de la característica deseada y a la que se le reconoce como una nueva variedad.



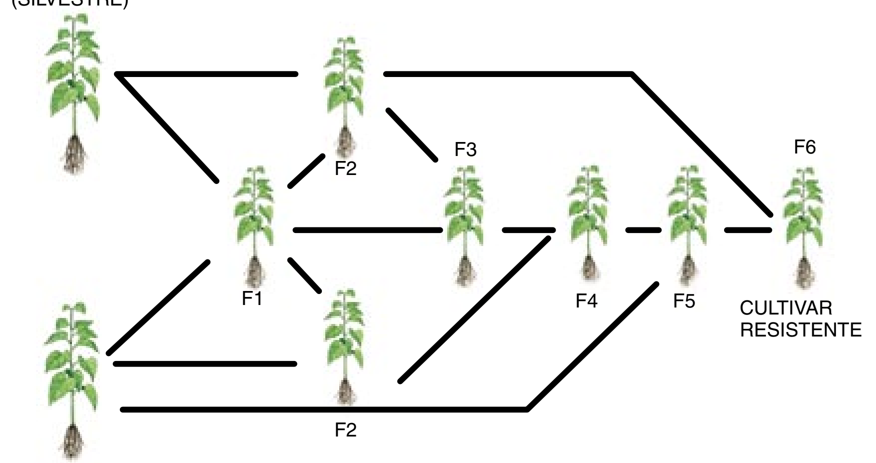
Todo el proceso de selección va acompañado de colectas de semillas o de pies enteros. Se guardan en bancos de germoplasma, para su utilización posterior. El principal factor limitante del proceso de producción de híbridos reside en la incompatibilidad sexual entre las especies seleccionadas como progenitores. Si entre ellas media una gran divergencia genética, será baja la probabilidad de obtener semillas viables de tal cruzamiento.

La mejora vegetal tradicional se ha venido practicando con un éxito innegable. Pero tales métodos resultan ya insuficientes para satisfacer las necesidades de alimentos impuestas por el crecimiento demográfico. Además, tienen el inconveniente de haber producido variedades que dependen en demasía de abonos agroquímicos, cuyo uso exagerado daña el medio.

Los programas de fitomejoramiento actuales, apoyados en la ingeniería genética, se proponen, igual que los de ayer, aumentar el rendimiento, disminuir las pérdidas ocasionadas por plagas y enfermedades y reducir los costos de producción. Pero abrigan intereses más ambiciosos en el ámbito industrial, químico y farmacéutico. Definida como la manipulación en el laboratorio de la información genética de un organismo utilizando técnicas de la biología molecular, la bioingeniería se está aplicando en agricultura para obtener cultivares transgénicos que superen en calidad a los conseguidos por métodos tradicionales.

Desde un punto de vista molecular, los caracteres que manifiesta un organismo (fenotipo) se reducen a la expresión orquestada de sus genes (genotipo) contenidos en el ADN, a través de los procesos de transcripción o producción de ARN mensajero y la traducción de éste en proteínas funcionales. Dichas proteínas, además de ser componentes estructurales de la célula, son también las enzimas que regulan la biosíntesis de los constituyentes celulares y, por tanto, responsables inmediatos de las propiedades del individuo.

1. APLICACIONES de la ingeniería genética de plantas. Las plantas transgénicas de papaya obtenidas por los autores expresan un gen bacteriano responsable de la síntesis de ácido cítrico (gen de la citratosintasa). Más aún, se convierten en resistentes a la intoxicación por aluminio. Los bioingenieros cultivaron las plantas en concentraciones de aluminio consideradas tóxicas. Por mor de comparación, nótese el efecto deletéreo que este metal tiene sobre el desarrollo de plantas no transgénicas (*izquierda*) y la resistencia conferida a las plantas por la introducción y expresión del gen de la citratosintasa (*derecha*).



2. FITOMEJORA TRADICIONAL. El sistema empleado desde antiguo para mejorar determinadas plantas consiste en cruzas dirigidas entre especies biológicamente emparentadas. A través de laboriosos y complicados procesos de selección y cruzamientos entre individuos sobresalientes, durante varias generaciones, se va intercambiando información genética, hasta obtener una variedad mejorada.

La expresión de los diferentes genes que porta un individuo está coordinada por elementos genéticos reguladores (promotores, potenciadores y silenciadores) que, si bien no se traducen en proteínas, sí determinan cambios en el crecimiento, desarrollo y diferenciación. Al fundarse en la selección de características fenotípicas, el mejoramiento tradicional deja de lado la participación de estos elementos reguladores.

La ingeniería genética permite el acceso y manipulación directa de la información contenida en el ADN. Posibilita incluso la creación de genes sintéticos. Por ello, esta técnica, también conocida como del ADN recombinante, rompe con las barreras impuestas por la incompatibilidad sexual y nos deja introducir en plantas genes provenientes no sólo de otras especies vegetales muy alejadas desde el punto de vista de la evolución, sino incluso de hongos, virus, bacterias y animales. De lo que se infiere que la obtención de plantas transgénicas (portadoras de un gen ajeno o heterólogo) representa el medio más versátil y preciso para producir variedades vegetales mejoradas.

De entrada, necesitamos clonar en un plásmido el gen de interés. Ese vector molecular debe asegurar la integración estable de los genes deseados en los cromosomas de las células vegetales. A partir de éstas, y mediante técnicas de cultivo de tejidos, se crean las plantas transgénicas. Se procede luego al análisis molecular de las plantas regeneradas *in vitro* para identificar aquellas que porten y expresen los transgenes (genes introducidos) en los niveles deseados. Finalmente, el comportamiento de los individuos transgénicos se estudia en experimentos de campo y laboratorio. Entre otras ventajas, este método asegura la especificidad de la característica incorporada y ahorra tiempo, pues basta con un solo ciclo de cultivo.

Con el descubrimiento de las enzimas de restricción, que cortan el ADN en sitios específicos, y de las ligasas, enzimas que empalman fragmentos de ADN, se sentaron las bases de la técnica del ADN recombinante. Gracias a ella, se consiguen organismos transformados o transgénicos, en los que se han insertado genes heterólogos.

En el caso de las plantas, para introducir nueva información genética deben satisfacerse dos requisitos: disponer de un método para la regeneración *in vitro* de la especie de interés y contar con un método de transformación eficiente. Por lo que concierne a la regeneración, con las técnicas de cultivo de tejidos pueden desarrollarse plantas completas a partir de cualquier célula o tejido. Su uso resulta, pues, indispensable

M.ª FERNANDA NIETO-JACOBO, ARTURO GUEVARA-GARCIA y LUIS HERRERA-ESTRELLA trabajan en la Unidad Irapuato del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional de México. Herrera formó parte del grupo de la Universidad de Gante que en 1984 obtuvo la primera planta transgénica. Fundador del Departamento de Ingeniería Genética de Plantas del Instituto Politécnico Nacional. Nieto es aquí becaria de investigación y Guevara profesor de investigación.

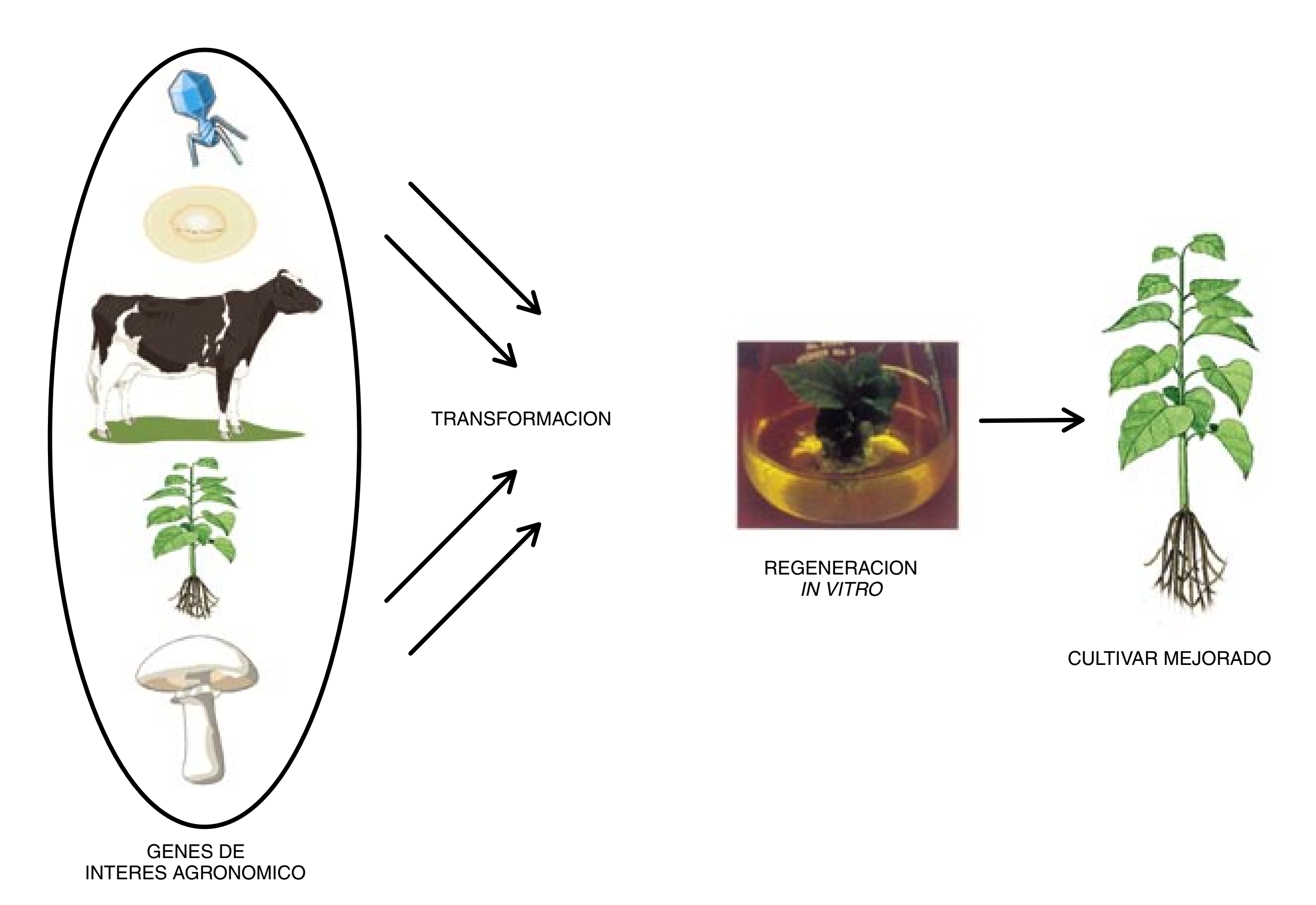
para la regeneración de individuos transgénicos que contengan la nueva información genética. En cuanto a la transformación se refiere, se ha de poder introducir el material genético deseado y lograr su integración estable, funcional y heredable en el genoma vegetal.

Las plantas transgénicas obtenidas hasta la fecha se desarrollaron a partir de diversos métodos de transformación genética. En efecto, hay un método biológico, basado en el empleo de cepas de bacterias del género *Agrobacterium,* otros fisicoquímicos de transformación directa, como la electroporación de protoplastos tratados con polietilenglicol y cloruro de calcio, y otros físicos, como el bombardeo con micropartículas recubiertas de ADN.

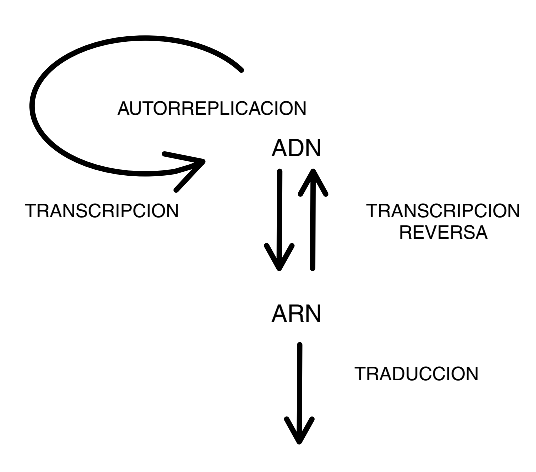
El primer método surgió del estudio del mecanismo de infección de *Agrobacterium tumefaciens*, una bacteria fitopatógena. A principio de los años setenta, se demostró que este microorganismo podía transferir ADN proveniente de uno de sus plásmidos (ADN circular extracromosómico) al genoma de las células vegetales. Se estudiaron los mecanismos de transferencia de dicho ADN, con la mirada puesta en el aprovechamiento del sistema para transferir genes heterólogos a plantas. En 1983 se informaba del primer episodio de expresión de un transgén en células vegetales; al año siguiente se obtuvo la primera planta de tabaco transgénica diseñada por ingeniería genética.

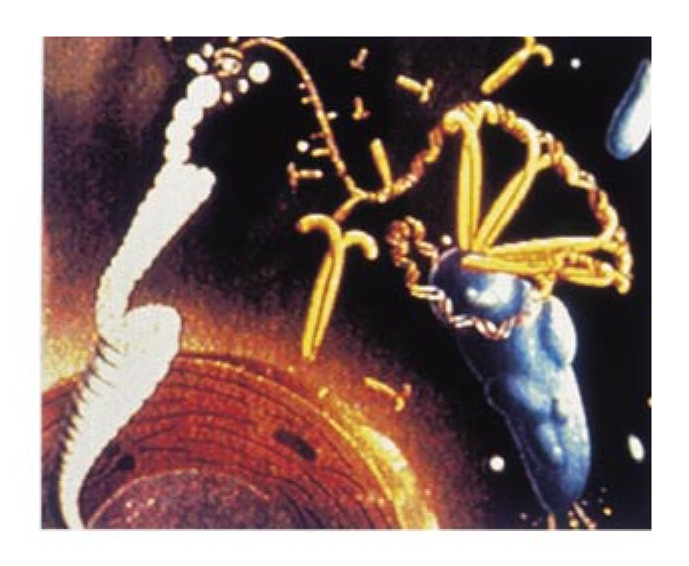
Había comenzado la era de la mejora vegetal por métodos biotecnológicos. Pronto se transfirió un gen que confiere resistencia contra el virus del mosaico del tabaco, el gen que confiere resistencia al herbicida glifosato y los de la familia de genes *cry*, provenientes de la bacteria *Bacillus thuringiensis*, que determinan proteínas entomotóxicas (que protegen a las plantas del ataque de insectos).

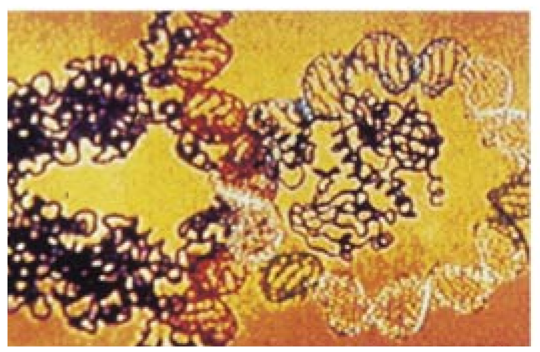
La supuesta incapacidad de *Agrobacterium* para infectar plantas monocotiledóneas impidió la transformación de arroz, trigo y maíz. Pero, dada la importancia alimentaria de esos cultivos, se buscaron técnicas alternativas. Así surgieron la introducción de ADN en células desprovistas de pared celular (protoplastos), utilizando sustancias permeabilizantes de la membrana plasmática, como el polietilenglicol, la aplicación de pulsos eléctricos de alto voltaje que abren poros en la membrana (electroporación) y la microinyección, o introducción directa de ADN en el núcleo de las células vegetales. Pese a todo, la aplicación de estos métodos ha sido muy limitada debido a las dificultades que entrañan.



3. FITOMEJORA MEDIANTE INGENIERIA GENETICA. Gracias a la biotecnología podemos aislar y clonar genes de interés antropocéntrico. Mediante el empleo de alguno de los métodos de transformación disponibles, dichos genes pueden incorporarse en el genoma de las plantas en un solo ciclo de cultivo.







PROTEINA:
SE REPRESENTA UN FACTOR DE TRANSCRIPCION INTERACTUANDO CON EL ADN.

4. DOGMA CENTRAL de la biología molecular. El esclarecimiento de la serie de acontecimientos que se suceden para la síntesis de una proteína, a partir de la información genética contenida en el ADN, representa la piedra angular sobre la que descansa la biología molecular y, por tanto, la ingeniería genética de plantas.

Los obstáculos contra la transformación de cereales se superaron por fin en 1987, cuando se diseñó un acelerador de partículas para bombardear células o segmentos de tejido vegetal con micropartículas recubiertas de ADN. Este método de biobalística, que permitió la transformación de maíz y arroz, se ha empleado con éxito en otras especies.

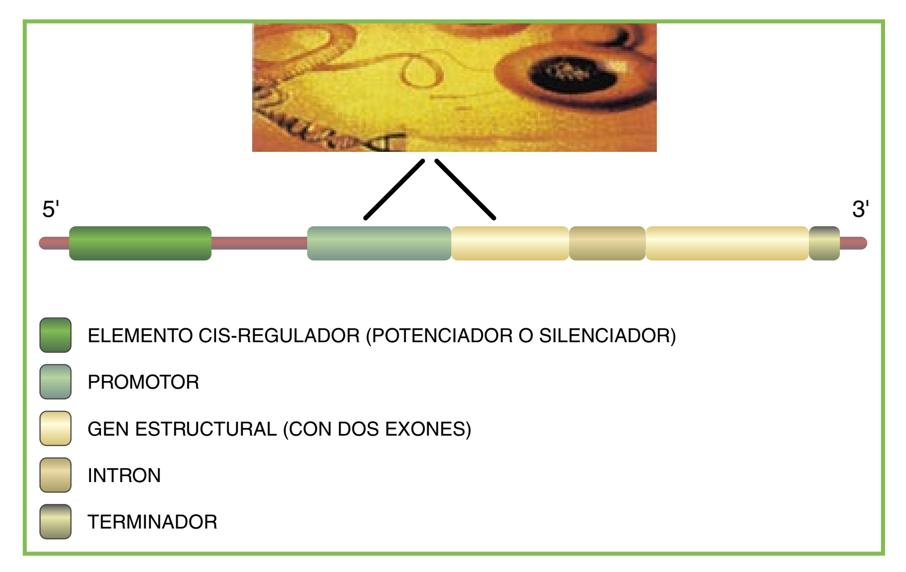
Las bacterias *Agrobacterium tumefaciens* y *A. rhizogenes* viven en la mayoría de los suelos e infectan especies muy diversas. La primera causa la tumoración alrededor de zonas heridas, o "agalla de la corona"; la segunda desencadena el crecimiento anormal de las raíces ("raíz pilosa").

Agrobacterium es el ingeniero genético de la naturaleza. Su mecanismo de infección, que arranca con la penetración a través de heridas, se caracteriza por la inserción de un segmento de su ADN, denominado ADN-T (ADN transferido), en el genoma de las células infectadas. Dicho ADN-T, contenido en plásmidos Ti (inductor de tumores) en *A. tumefaciens* y Ri (inductor de raíces) en *A. rhizogenes*, incluye genes responsables de la síntesis de reguladores del crecimiento vegetal, causantes del crecimiento anormal típico de las enfermedades provocadas por estas bacterias, y genes para la síntesis de opinas, productos nitrocarbonados de los que el microorganismo se nutre para su desarrollo y reproducción. Los genes de origen bacteriano contenidos en el ADN-T, una vez integrados en el genoma vegetal, son procesados por la planta para fabricar proteínas funcionales.

Apoyados en estos nuevos conocimientos, varios grupos de investigación se dedicaron a modificar los plásmidos Ti/Ri; conservaron en ellos las secuencias necesarias para la transmisión e integración del ADN-T en el genoma vegetal, y eliminaron los genes bacterianos responsables de la formación de tumores o raíces (cepas no oncogénicas). Así, se logró la producción de plantas transgénicas "infectando", con cepas de *Agrobacterium* inermes, segmentos de hoja. A partir de éstos, y mediante un proceso de regeneración por cultivo de tejidos, se recuperaron plantas completas.

La biobalística, con su bombardeo con micropartículas cubiertas con ADN o con cualquier otra biomolécula que se pretenda introducir en células vegetales, ha cosechado óptimos resultados. Se utilizan microproyectiles de oro o tungsteno (químicamente inertes), que gracias al acelerador de partículas salen disparados a velocidad supersónica, lo que les permite atravesar la pared y la membrana de la célula vegetal bombardeada sin causarle daños letales.

Para el bombardeo se puede emplear cualquier tipo de explante vegetal, desde células y protoplastos hasta plántulas completas, pasando por tejidos organizados en embriones y meristemos. En ocasiones se puede incluso prescindir de los métodos de regeneración *in vitro* necesarios para recuperar plantas a partir de células o de segmentos de tejidos indiferenciados.



5. ESTRUCTURA TIPICA DE UN GEN EUCARIOTA. El ADN contenido en el núcleo de las células consta de miles de genes que portan la información relativa a la síntesis de las proteínas de un organismo. Los genes estructurales, que determinan la síntesis de proteínas, no forman secuencias continuas; a menudo están interrumpidos por regiones no codificantes (intrones). Además, los genes constan de regiones reguladoras que, si bien no son traducidas en proteínas, revisten importancia primordial para determinar los patrones y niveles de expresión del gen que controlan. Tal es el caso de los promotores y terminadores, que establecen los sitios de inicio y terminación de la transcripción respectivamente, y de los potenciadores y silenciadores, que capacitan a los genes para encenderse o apagarse, en respuesta a estímulos endógenos y ambientales.

La biobalística tiene manifiestas limitaciones. Algunos tejidos oponen una resistencia natural a la penetración de las partículas, dada por cutículas endurecidas, paredes celulares lignificadas o superficies vellosas. Sin embargo, el principal escollo del método continúa siendo la baja relación entre el total de células sometidas al bombardeo y el número de células que logran incorporar de manera permanente la información genética transferida.

A pesar de la desventaja que representa el bajo número de transformantes producido por un solo episodio de bombardeo, la versatilidad de la aceleración de partículas para introducir transgenes ha superado muchas de las barreras asociadas a otros métodos de transformación, como son el rango de huéspedes de *Agrobacterium* y las dificultades inherentes al cultivo y regeneración de protoplastos. La biobalística ha demostrado ser la mejor opción para la producción de plantas transgénicas de soja, maíz, sorgo, papaya, espárrago, caña de azúcar, arroz y trigo.

Con las nuevas técnicas se logran plantas capaces de rendir productos de alto valor económico y ambiental, desde fibras hasta enzimas, pasando por medicinas, vacunas y plásticos biodegradables. Atención especial merecen las plantas capaces de extraer y concentrar iones metálicos del suelo, agua y aire, que facilitarían la regeneración de los entornos contaminados.

Las plantas transgénicas representan una de las herramientas más útiles y versátiles para estudiar el proceso de regulación genética en organismos eucariotas, ya que permiten dirigir, reforzar, silenciar y seguir la expresión de genes. Dicha expresión genética, cascada de acontecimientos que conducen a la síntesis de una proteína mediante la decodificación de la información contenida en el ADN, es un proceso complejo y sometido a regulación en varios niveles, entre los que la producción de mensajeros (transcripción) acostumbra ser el más importante.

El modelo de transcripción vigente implica que cada gen está equipado con elementos reguladores constituidos por secuencias específicas de ADN. Dichos elementos representan sitios de unión para proteínas reguladoras; las interacciones entre ambos controlan los patrones de activación y represión de la expresión de genes que caracterizan a los organismos superiores. Necesitamos, pues, dominar el proceso de la transcripción para entender y manipular la expresión genética.

La caracterización molecular de los elementos reguladores, sumada a la expresión controlada en plantas transgénicas de las proteínas reguladoras de la transcripción, habrá de conducir a la comprensión cabal de los mecanismos de regulación genética. En el proceso de la caracterización funcional de genes tendrá importante participación la introducción de transgenes en antisentido que, al generar cadenas de ARNm complementarias a las que se transcriben del gen nativo, impiden su traducción e inhiben su actividad. Intervendrán, asimismo, las inserciones múltiples de transgenes, que resultan en la inactivación del gen nativo y de las copias transgénicas.

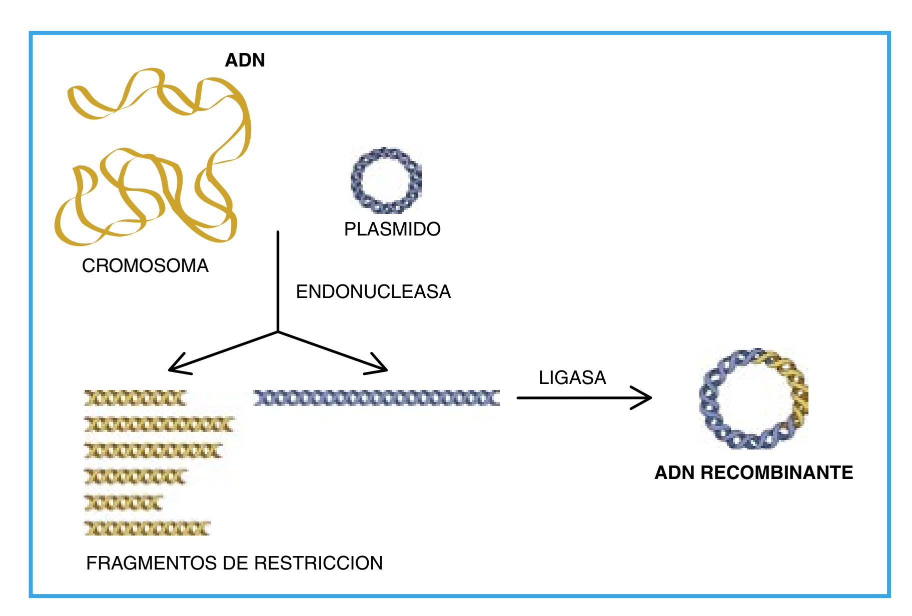
El control de las enfermedades, plagas y malezas que atacan a los cultivos suele llevarse a cabo con productos químicos cuyo proceso de fabricación y aplicación desmedida inducen daños irreversibles en el medio. Para el control de malezas que compiten con las plantas cultivadas por espacio y nutrientes se utilizan herbicidas que afectan a la fotosíntesis o la biosíntesis de compuestos esenciales. Puesto que estos procesos no son exclusivos de las malezas, el efecto de los herbicidas no es selectivo y su uso queda restringido a un limitado grupo de cultivos. La creación de plantas transgénicas tolerantes a herbicidas parece la mejor opción para el control de las malezas. En esa línea se seleccionan variedades que contienen enzimas insensibles al principio activo del producto o son capaces de degradarlos y detoxificarlos.

El mejor ejemplo de la primera estrategia queda representado por plantas transgénicas que, al producir en exceso la enzima 5-enol-piruvilshiquimato-3 fosfato, gracias a la expresión del transgén correspondiente, manifestaron una tolerancia significativa al herbicida glifosato, compuesto que inhibe la biosíntesis de algunos aminoácidos esenciales.

En cuanto a la detoxificación, se puede mencionar al gen *bar* que codifica una enzima capaz de inactivar, mediante la acetilación de grupos amino libres, al compuesto fosfinotricina, principio activo de varios herbicidas. En experimentos de campo, plantas transgénicas de tabaco y patata portadoras del gen *bar* han manifestado niveles óptimos de resistencia al herbicida bialafos,

Especies vegetales transformadas por ingeniería genética

Nombre común	Nombre científico	Método de transformación
Alamo	*Populus spp.*	*Agrobacterium* BIOBALISTICA
Albaricoque	*Prunus armeniaca*	*Agrobacterium*
Alerce europeo	*Larix spp.*	*Agrobacterium*
Alfalfa	*Medicago sativa*	*Agrobacterium*
Algodón	*Grossypium hirsutum*	*Agrobacterium*
Apio	*Apium graveolens*	*Agrobacterium*
Arándano	*Vaccinium macrocarpum*	*Agrobacterium* BIOBALISTICA
Arroz	*Oryza sativa*	*Agrobacterium* BIOBALISTICA ELECTROPORACION MICROINYECCION
Brócoli	*Brassica oleraceae*	*Agrobacterium*
Canola	*Brassica napus*	*Agrobacterium* ELECTROPORACION MICROINYECCION
Caña de azúcar	*Saccharum spp.*	BIOBALISTICA
Chícharo	*Pisum sativum*	*Agrobacterium*
Ciruelo	*Prunus domestica*	*Agrobacterium*
Cítricos	*Citrus spp.*	*Agrobacterium* POLIETILENGLICOL
Clavel	*Dianthus caryophyllus*	*Agrobacterium*
Crisantemo	*Dendranthema indicum*	*Agrobacterium*
Espárrago	*Asparagus officinalis*	*Agrobacterium*
Frambuesa	*Rubus spp.*	*Agrobacterium*
Fresa	*Fragaria anannassa*	*Agrobacterium* ELECTROPORACION
Girasol	*Helianthus annus*	*Agrobacterium*
Hinojo	*Foeniculum vulgare*	*Agrobacterium*
Kiwi	*Actinidia deliciosa*	*Agrobacterium*
Lechuga	*Lactuca sativa*	*Agrobacterium*
Lino	*Linum usitatissimum*	*Agrobacterium*
Maíz	*Zea mays*	*Agrobacterium* BIOBALISTICA ELECTROPORACION
Manzana	*Malus pumila*	*Agrobacterium*
Melocotón	*Prunus persica*	*Agrobacterium*
Melón	*Cucumis melo*	*Agrobacterium*
Mostaza india	*Brassica juncea*	*Agrobacterium*
Papa	*Solanum tuberosum*	*Agrobacterium*
Papaya	*Carica papaya*	BIOBALISTICA
Pepino	*Cucumis sativus*	*Agrobacterium*
Petunia	*Petunia hybrida*	*Agrobacterium*
Rábano	*Armoracia lapathifolia*	*Agrobacterium*
Remolacha	*Beta vulgaris*	*Agrobacterium*
Soja	*Glicine max*	*Agrobacterium* BIOBALISTICA
Tabaco	*Nicotiana tabacum*	*Agrobacterium* BIOBALISTICA ELECTROPORACION POLIETILENGLICOL ULTRASONICACION
Trébol blanco	*Trifolium repens*	*Agrobacterium*
Trigo	*Triticum aestivum*	BIOBALISTICA
Trigo sarraceno	*Fagopyrum esculentum*	*Agrobacterium*
Zanahoria	*Daucus carota*	*Agrobacterium*



6. CONSTRUCCION DE ADN RECOMBINANTE. Implica ésta la manipulación en el laboratorio del ADN de cualquier organismo con enzimas capaces de cortar el ADN en sitios específicos (endonucleasas) y la posterior inserción de los fragmentos resultantes, que contienen diferentes y determinados genes, en un plásmido (vehículo molecular), mediante la acción de una enzima capaz de unir el ADN (ligasa).

en cuya composición se incluye fosfinotricina.

Para proteger a las plantas del ataque de organismos fitopatógenos, la biotecnología potencia los mecanismos de defensa naturales. Así ocurre con la manipulación de la producción de las proteínas denominadas PR (por "respuesta a patógenos"), capaces de afectar al organismo invasor o de activar rutas de transducción de señales responsables de iniciar mecanismos generales de defensa. Se ha recurrido también a la expresión de transgenes, provenientes del mismo fitopatógeno o de sus enemigos naturales, que afectan el desarrollo normal del ciclo de vida de los agentes infecciosos.

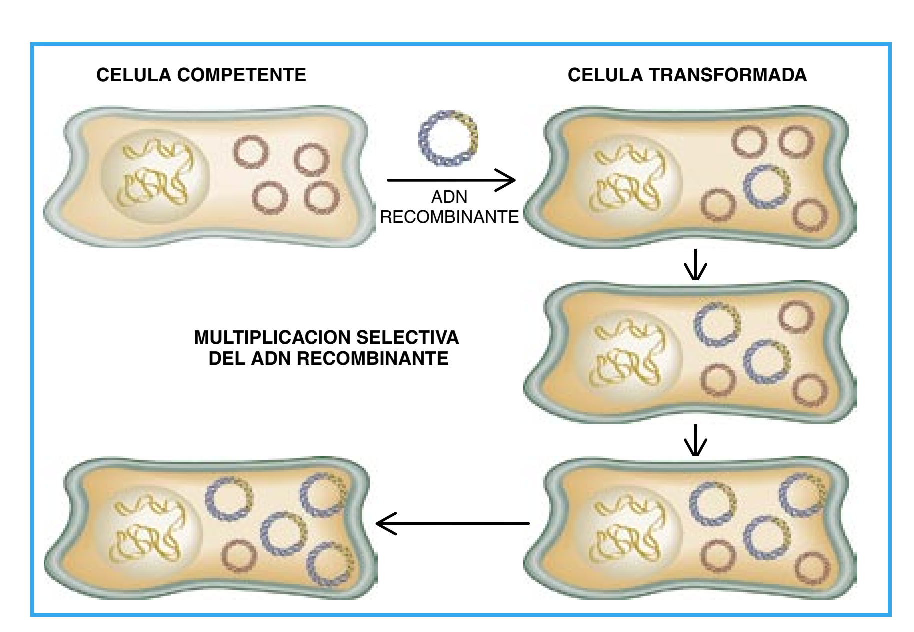
La propuesta biotecnológica para el control de hongos patógenos se basa en la sobreexpresión de enzimas (PR) degradadoras de la pared celular de esos organismos. Tal es el caso del transgén de la quitinasa, que al degradar al polisacárido quitina (principal constituyente de la pared celular de muchos hongos fitopatógenos), confiere resistencia contra ciertas enfermedades fúngicas.

Muchas bacterias fitopatógenas producen toxinas que inhiben rutas del metabolismo primario y causan muerte celular. Por su parte, las bacterias productoras de toxinas poseen genes que determinan enzimas insensibles al efecto de dichos compuestos. Gracias a la expresión de los genes bacterianos insensibles a toxinas, las plantas no alteran su desarrollo cuando sufren el ataque del fitopatógeno. Mediante la expresión de un gen proveniente del agente causal de la enfermedad (*Pseudomonas syringae* pv *phaseolicola*), que cifra una enzima insensible a la faseolotoxina, se crearon plantas transgénicas resistentes al "tizón del halo".

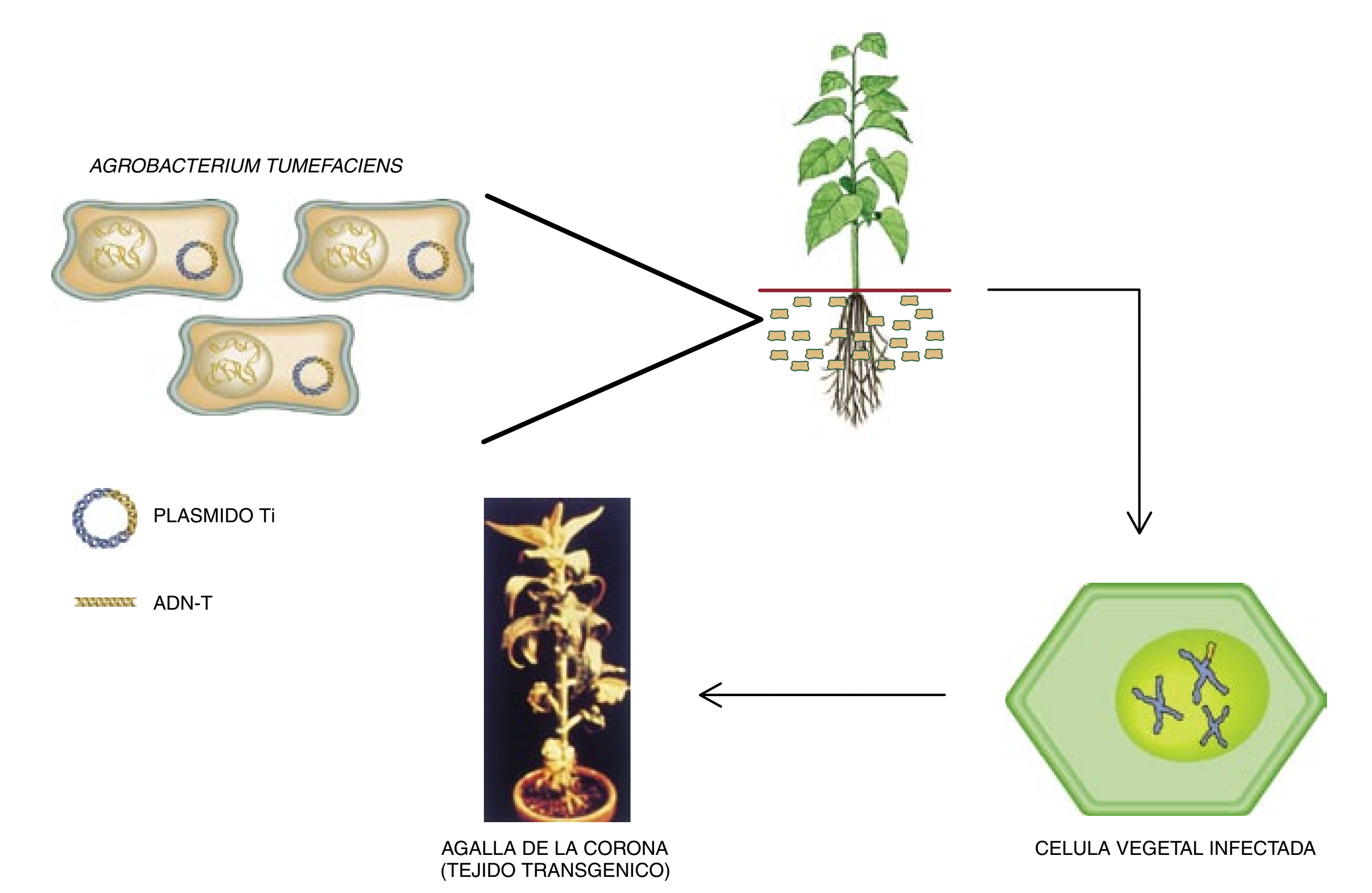
Los virus constituyen los agentes fitopatogénicos más devastadores, pues no existe ninguna medida de control efectiva contra su ataque. Para combatir las enfermedades de origen vírico, se intenta impedir su replicación dentro de la célula infectada y su diseminación ulterior. En el primer caso, la introducción en plantas del gen de la proteína de la cápside vírica ha comportado la pérdida o disminución de la patogenicidad. Siguiendo esta estrategia, se lograron plantas transgénicas de calabaza que, al expresar el gen de la cubierta proteica de los virus del mosaico del pepino, del mosaico de la sandía o del mosaico de la calabaza, se tornaron resistentes a los tres agentes infecciosos. Curiosamente, las plantas resistentes acumularon niveles de proteína vírica mucho menores (inferiores al 0,1 %) que los presentes en plantas infectadas por alguno de estos virus.

En cuanto a impedir la diseminación celular del virus, se ha conseguido ya identificar e introducir genes víricos involucrados en el movimiento intercelular, gracias a cuya expresión disminuyó la sintomatología.

En condiciones naturales, las interacciones planta-insecto revisten un interés vital para ambos organismos.



7. CLONACION DE ADN RECOMBINANTE. Se logra mediante la introducción, multiplicación y perpetuación de plásmidos recombinantes en bacterias. Para ello, las bacterias (usualmente *Escherichia coli*) se tratan con sustancias que permeabilizan su pared celular (como cloruro de calcio o rubidio) y las capacitan para permitir, a través de procesos fisicoquímicos (temperatura o electricidad), la entrada de los plásmidos recombinantes.



8. MECANISMO DE INFECCION de *Agrobacterium tumefaciens*. Es ésta una bacteria fitopatógena que induce tumores (agallas) en las plantas a las que infecta. Dichos tumores son resultado de la capacidad del microorganismo de transferir e insertar en el genoma vegetal una pequeña región (ADN-T) de un plásmido denominado Ti (inductor de tumores). A la expresión de los genes contenidos en el ADN-T obedece el crecimiento tumoral que caracteriza a la enfermedad.

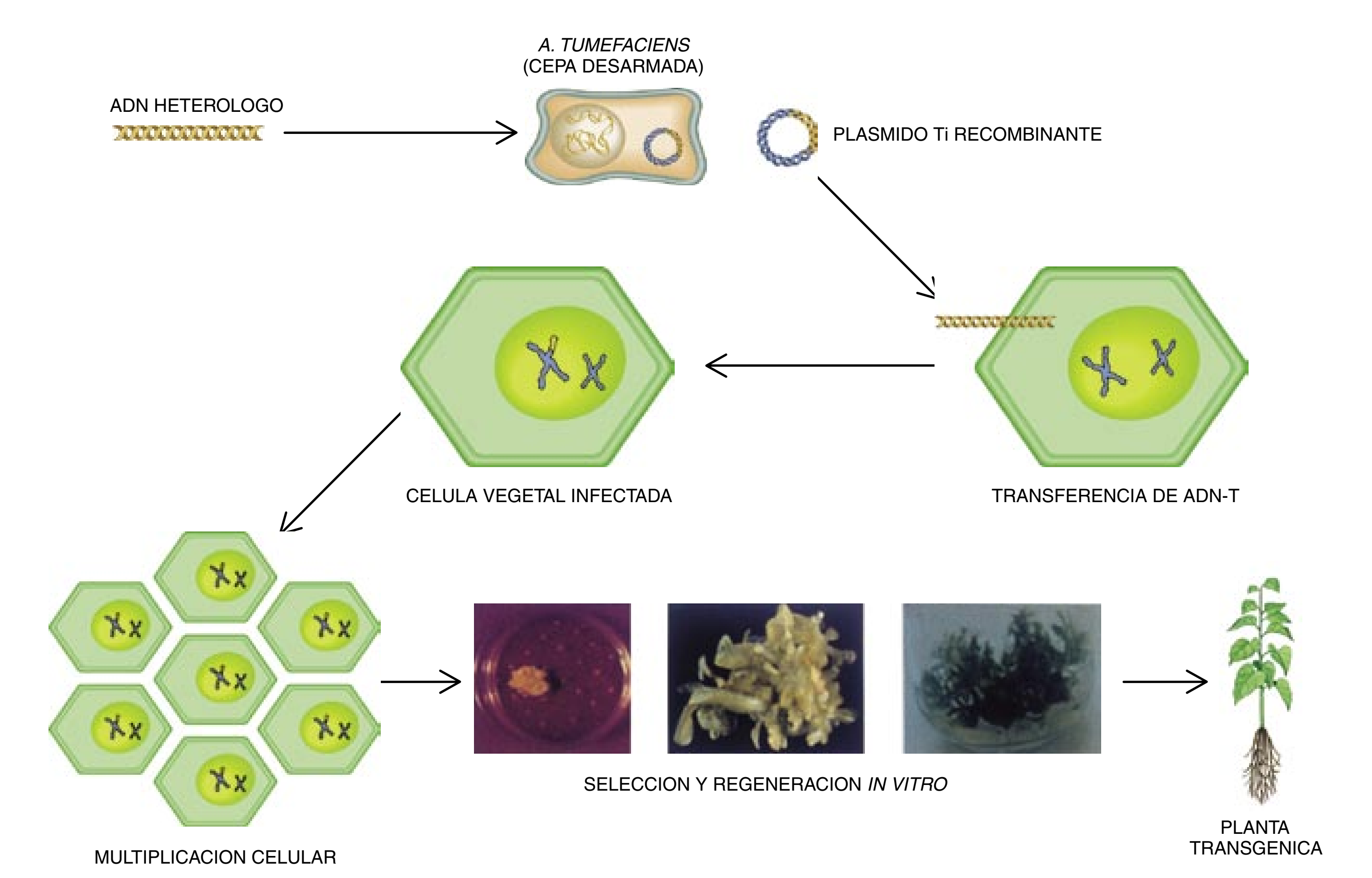
Las plantas se ven beneficiadas en el proceso de la polinización, de la remoción de tejido muerto y de la eliminación de insectos dañinos. Sin embargo, la mayoría de las plantas cultivadas, al sembrarse en regiones diferentes de sus centros de origen, se exponen al ataque de especies regionales de insectos, lo que constituye una de las principales causas de pérdidas de productos agrícolas. El problema adquiere mayor gravedad cuando se consideran las pérdidas durante el almacenamiento de granos y semillas. Por tal razón, la obtención de cultivares resistentes a plagas es una de las prioridades de cualquier programa de fitomejoramiento.

Para resolver el problema, la ingeniería genética se ha centrado en dos grupos de genes. Comprende uno, procedente de *Bacillus thuringiensis*, a los que determinan proteínas cristalinas con propiedades insecticidas. Los productos de estos genes —las delta-endotoxinas— manifiestan una actividad específica ante distintos grupos de insectos; por ejemplo, las proteínas cryI son activas contra lepidópteros (polillas y mariposas) y las cryIII sólo contra coleópteros (escarabajos). En plantas de tabaco, jitomate, papa, algodón y maíz, se han introducido diversos genes de *B. thuringiensis*, con los que, una vez lograda la sobreexpresión de los mismos, se han obtenido resultados impresionantes en el control de plagas.

Pero muchas especies de insectos no son sensibles a las proteínas cry. La búsqueda de otros genes cuyos productos tengan propiedades insecticidas es, en efecto, una labor permanente. Se está experimentando polifenoloxidasa, enzima que produce compuestos entomotóxicos, la familia de las colesteroloxidasas, que alteran la integridad y funcionalidad de las membranas celulares, y los inhibidores de proteasas y alfa-amilasas (miembros de la batería de proteínas PR), que obstaculizan el funcionamiento de las enzimas digestivas de los insectos.

Desearían los fruticultores retardar la maduración y reducir las pérdidas poscosecha al aumentar la vida de anaquel. Mediante la técnica del ARN antisentido, se han generado plantas transgénicas de jitomate en las que se ha inhibido la expresión de genes importantes en el proceso de maduración. Así, al frenar la síntesis de una enzima encargada de destruir la pectina, que proporciona rigidez a las células del fruto, éste retiene su consistencia más tiempo. En la misma línea, se han logrado aumentos considerables en la vida de anaquel mediante la supresión de enzimas claves para la biosíntesis del etileno, uno de los compuestos responsables del proceso de maduración.

Las plantas encierran un enorme potencial para la fabricación a gran escala de productos químicos derivados de sus metabolismos primario y secundario, a través de la manipulación genética de sus rutas biosintéticas. Para ello, no sólo pueden usarse individuos completos como verdaderos biorreactores, sino que, además, la disponibilidad de métodos para el cultivo *in vitro* de células vegetales representa una excelente alternativa para la manufacturación de



9. SISTEMA *AGROBACTERIUM* de transformación genética. Explotando el mecanismo de infección natural de este fitopatógeno, se generan plantas transgénicas mediante la construcción en el laboratorio de cepas no oncogénicas (cuyos plásmidos Ti han sido manipulados); para ello se sustituyen los genes responsables de la formación de tumores por genes de interés agronómico que desean integrarse en el genoma vegetal.

fitoquímicos en fermentadores respetuosos con el medio y económicos. Lo que exigirá mejorar la capacidad de acumulación del producto dentro de la célula o, en el caso de células en cultivo, aumentar los niveles de excreción al medio.

De los productos vegetales de interés destacan algunos carbohidratos, utilizados en la industria como edulcorantes (sacarosa) y en la elaboración de polímeros biodegradables (almidón). Igualmente, lípidos que sirven como materia prima en la elaboración de nailon (ácido adípico) y detergentes (ácido láurico). Atención especial recibirá la manipulación del metabolismo secundario para mejorar la producción de pigmentos (antocianinas), alcaloides (escopolamina) y antibióticos de origen vegetal (resveratrol).

Porque las plantas no son huéspedes naturales de agentes infecciosos para el hombre, su aprovechamiento terapéutico tiene ventajas sobre el empleo de microorganismos, líneas celulares y tejidos animales. De hecho, la proteína anticoagulante humana C(hPc), al igual que la enzima humana glucocerebrosidasa (hGc), aconsejada contra la enfermedad cerebral de Gaucher, se han obtenido en hojas de plantas transgénicas.

Se han desarrollado métodos para expresar en plantas genes que cifran la síntesis de inmunoglobulinas, proteínas que los organismos animales elaboran para defenderse del ataque de agentes infecciosos. Tal es el caso de la producción en plantas de tabaco de anticuerpos monoclonales contra el agente de la caries dental (*Streptococcus mutans*).

El maíz, el arroz y el trigo, alimentos básicos de la dieta, adolecen de severas deficiencias en su contenido de aminoácidos esenciales. Por eso se trabaja ya en la obtención de plantas cuyas proteínas contengan mayores niveles de aminoácidos esenciales (lisina y metionina principalmente). Por ejemplo, en soja y canola, se han logrado incrementos de hasta el 18 % y el 30 % respectivamente, en sus contenidos de metionina. Igualmente se experimenta en la modificación del tipo y concentración de carbohidratos y lípidos para mejorar el contenido energético y las propiedades funcionales de sus harinas.

Tampoco la investigación ha olvidado la remoción y modificación de compuestos tóxicos o alergénicos en alimentos de origen vegetal. En el arroz se ha intentado inducir mutaciones de una proteína que causa dermatitis atípica en niños japoneses y alterar la composición proteica del gluten al que muchas personas manifiestan alergia.

Una de las aplicaciones más prometedoras de las plantas transgénicas concierne al dominio de la contaminación ambiental. Se habla de fitorregeneración (o biorremediación) para designar el aprovechamiento de la capacidad de las plantas para extraer, concentrar e incluso modificar moléculas orgánicas e inorgánicas del medio donde medran. Sirva de modelo *Arabidopsis thaliana*. Esta planta, al incorporar el gen de la enzima bacteriana mercurio ion reductasa (*mer A*), ha posibilitado el crecimiento de individuos transgénicos en presencia de concentraciones tóxicas de mercurio, pues permite la volatización del

metal del suelo a la atmósfera. Los genes de microorganismos capaces de vivir en ambientes contaminados con metales pesados podrían integrarse en plantas que limpiaran de cobre, plomo y cromo los suelos.

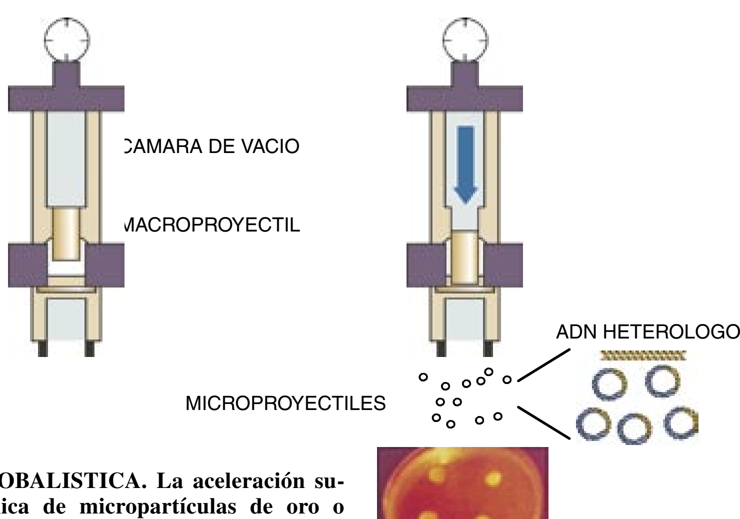
A propósito del aluminio, la introducción en plantas de tabaco y papaya del gen de *Pseudomonas aeruginosa*, que determina la enzima citratosintasa, permite a las plantas transformadas sobreproducir ácido cítrico y crecer en presencia de concentraciones tóxicas de dicho metal. Aunque se desconocen los mecanismos fisiológicos y moleculares implicados en la tolerancia, la posibilidad de aplicar esta técnica está abierta. El propio gen de la citratosintasa ha sido transferido a algas clorófitas, para combatir la acidificación en aguas contaminadas por desechos industriales.

En el campo de la salud, se ha demostrado que los frutos de plantas transgénicas sintetizan y acumulan proteínas antigénicas; dicho de otro modo, en el futuro podrían convertirse en vacunas orales contra virus y bacterias. Se ha empezado ya por estudiar sus posibilidades en infecciones gastrointestinales y respiratorias, las principales causas de mortalidad infantil en los países en vías de desarrollo. Muchas enfermedades diarreicas son causadas por bacterias, como *Escherichia coli*, que producen toxinas responsables del cuadro clínico. Tras aislarse los genes de dichas toxinas, se han introducido en plantas de papa. Los ratones alimentados con papas transgénicas, que acumulan la toxina en tubérculos, produjeron niveles elevados de anticuerpos y manifestaron resistencia a la infección.

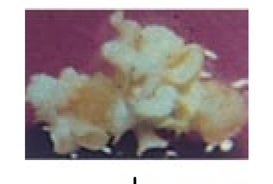
Las especies vegetales que mejor podrían servir para la producción de "vacunas" están por determinarse. Por crecer en regiones en las que se incluyen la mayoría de los países en vías de desarrollo, ser ampliamente aceptados y abundantemente consumidos en fresco por la población infantil, los frutos tropicales (mango, papaya y plátano, entre otros) resultan excelentes candidatos para estos fines.

Un buen ejemplo de la comercialización actual y potencial lo representa la familia de los genes *cry* de *B. thuringiensis*. Muchas compañías y universidades han trabajado en esa dirección. Hasta 1996 existían 410 patentes de genes *cry*.

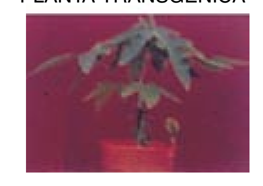
Las primeras pruebas en campo con cultivos transgénicos de tabaco se realizaron hacia 1986 en Francia y Estados Unidos. Desde entonces, se han modificado por ingeniería genética más de 70 especies de plantas; 56 de ellas han pasado ya a los ensayos en campo. Durante 1991 y 1992, en Holanda y Canadá se realizaron más de 10 pruebas de campo con cultivares transgénicos de papa. Y existe información sobre cultivares transgénicos de tomate en México (1986), tabaco en Cuba (1990) y maíz en Argentina (1991).











10. BIOBALISTICA. La aceleración supersónica de micropartículas de oro o tungsteno recubiertas de ADN, mediante el uso de una "pistola de aire", permite la introducción de ADN en células vegetales y su eventual integración en los cromosomas. Se recurre a técnicas de cultivo de tejidos para regenerar plantas transgénicas a partir de las células bombardeadas.

En total, hasta 1997 se habían llevado a cabo en todo el mundo 3647 pruebas de campo con cultivos transgénicos principalmente de maíz (28 %), canola (18 %), papa (10 %), tomate (9,5 %), soja (7,5 %), algodón (6 %), tabaco (4,5 %) y melón y pepino (2,5 %). Todos ellos han pasado ya a la fase de comercialización. Aproximadamente el 25 % de ellos son cultivos transgénicos con genes *cry*, si bien existen en el mercado cultivares transgénicos con tolerancia a herbicidas y virus. Entre las especies vegetales transgénicas comercializadas el maíz ocupa el primer puesto, seguido por la papa y el algodón.

El primer cultivo transgénico (tabaco resistente a virus) se comercializó en China a principios de 1990. En 1994, se vendieron en Estados Unidos tomates transgénicos con retraso en la maduración. Durante 1997 se sembraron ya cultivos transgénicos

en más de 1,2 millones de hectáreas en los Estados Unidos, en tanto que el total mundial de área agrícola cubierta por plantas transgénicas superó los 15 millones de hectáreas.

El advenimiento de una nueva técnica despierta siempre inquietud. El uso de productos de la ingeniería genética no supone la excepción de la regla. Temen algunos que las plantas transgénicas resistentes transmitan sus características a especies silvestres convirtiéndolas en malezas incontrolables. Se habla del peligro de plagas y enfermedades más agresivas. Singular recelo provocan los virus. Dada la estrategia para generar resistencia (integración en el genoma vegetal de parte del genoma vírico), cabría, en principio, el desarrollo de recombinaciones genéticas con resultados impredecibles.

Pero añadamos en seguida que la recombinación genética y la transferencia intraespecífica e incluso interespecífica son fenómenos normales en la naturaleza. De hecho, representan la fuerza motriz de la evolución de las especies. Basta mencionar que la relación simbiótica entre bacterias del género *Rhizobium* y plantas leguminosas, que faculta a las plantas para fijar el nitrógeno atmosférico, bien podría ser el resultado del intercambio interespecífico de genes.

Crean inquietud los genes de resistencia a antibióticos, empleados como marcadores de selección en el proceso de producción de plantas transgénicas. Se teme que pudieran pasar a los microorganismos que habitan en el tracto digestivo de los animales consumidores y generarse patógenos resistentes a dichos antibióticos. Un miedo a todas luces infundado. Clonados hace ya varias décadas, los genes de resistencia están clínicamente controlados. En todo caso, existe un riesgo mayor en el uso indiscriminado de antibióticos que se emplean como aditivos de alimentos comerciales para animales de granja.

Los detractores de la ingeniería genética suelen aducir que durante el proceso de transformación de plantas la integración de los transgenes en el genoma vegetal es aleatoria, como si dijeran que la introducción de un transgén podría silenciar o activar la expresión de algún o algunos genes cercanos al sitio de inserción y alterar el balance proteico de las plantas transformadas. Ante esa objeción hay que aclarar que con las prácticas tradicionales de fitomejora también ocurren recombinaciones y mutaciones que causan alteraciones en los niveles de expresión de determinados genes y que esto nunca ha representado problemas. En una reunión celebrada en 1995 por la Organización Mundial de la Salud, se concluyó que no existía ninguna diferencia entre la composición de los productos alimenticios derivados de plantas transgénicas y la de las obtenidas por métodos tradicionales.

En la Unión Europea quedó prohibida, desde el 31 de julio de 1997, la entrada de plantas transgénicas generadas allende sus fronteras. Es una legislación que tendrá que revisarse en cuanto se corrobore la inocuidad de tales cultivos. Como ejemplo, el éxito de los científicos mexicanos en la obtención de plantas transgénicas que, al expresar un gen bacteriano que determina la biosíntesis de ácido cítrico, resultaron tolerantes a aluminio. La toxicidad por este metal es un problema que aqueja a más del 40 % de las tierras potencialmente cultivables en el mundo. El uso de dichas plantas transgénicas en países tropicales de Asia, Africa y Sudamérica permitirá abrir a cultivo tierras que, por contener niveles tóxicos de aluminio, hasta hoy resultaban incultivables, así como reducir la creciente deforestación de bosques, asociada a la búsqueda de nuevas zonas de cultivo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

INSECT PEST CONTROL BY COPYING NATURE USING GENETICALLY ENGINEERED CROPS. D. Boulter, en *Phytochemistry*, vol. 34, págs. 1453-1466; 1993.

PARTICLE BOMBARDMENT. P. Christou, en *Methods in Cell Biology*, vol. 50, págs. 375-382; 1995.

GENETIC MODIFICATION OF PROTEINS IN FOOD. P. R. Day, en *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 36, págs. 49-67; 1996.

EDIBLE VACCINES. C. J. Arntzen, en *Public Health Reports*, vol. 112, págs. 191-197; 1997.

ALUMINUM TOLERANCE IN TRANSGENIC PLANTS BY ALTERATION OF CITRATE SYNTHESIS. J. M. De la Fuente, V. Ramírez-Rodríguez, J. L. Cabrera-Ponce y L. Herrera-Estrella, en *Science*, vol. 276, páginas 1566-1568; 1997.

INSECT RESISTANCE IN CROPS: A CASE STUDY OF *BACILLUS THURINGIENSIS (BT)* AND ITS TRANSFER TO DEVELOPING COUNTRIES. A. F. Krattiger. ISAAA Briefs, n.º 2; 42 págs.; 1997.

Shawn Carlson

Un reto flotante

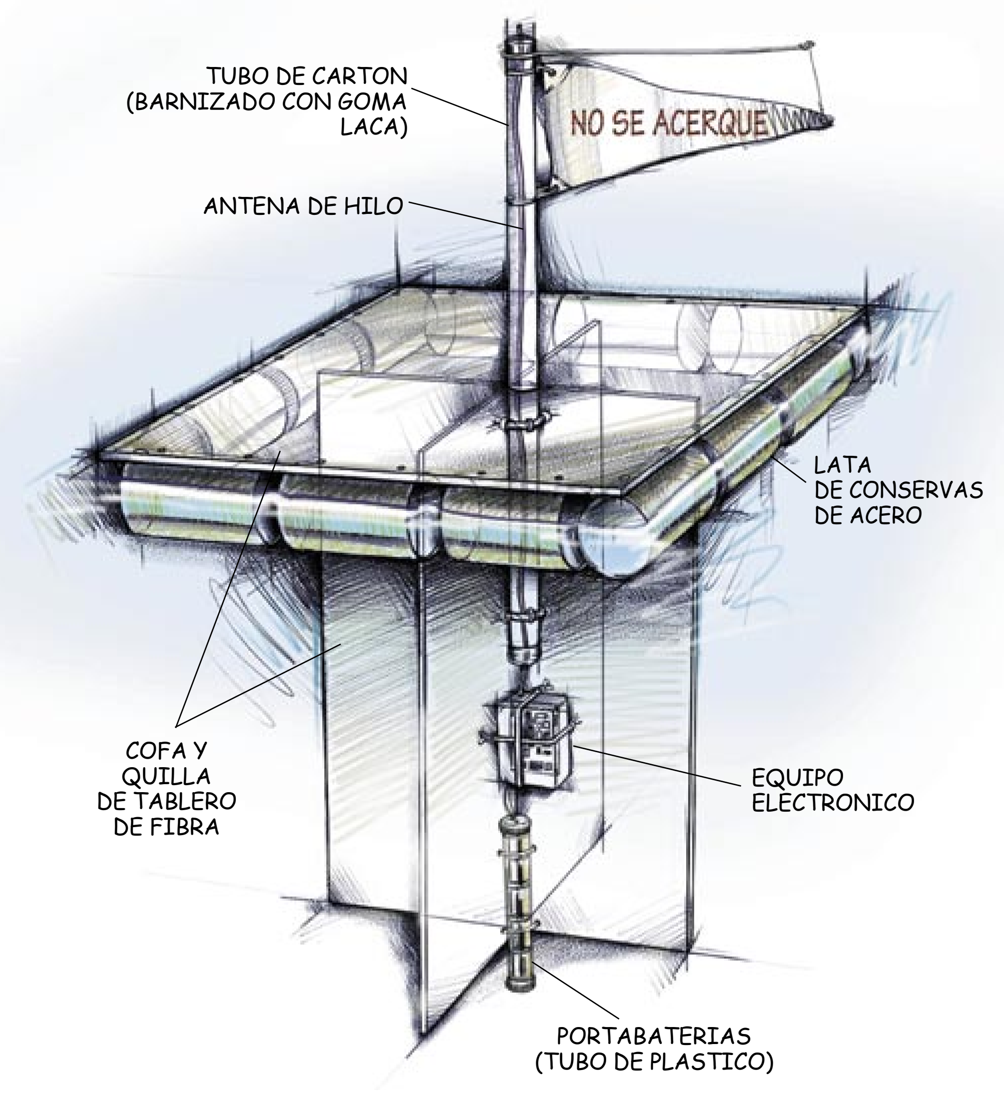
Una llamada telefónica inesperada de un funcionario público no suele anunciar buenas noticias, sino problemas. Afortunadamente no fue esto lo que pasó con una que recibí recientemente de la metrópolis burocrática norteamericana, Washington. Mi comunicante, un investigador perteneciente al Servicio de Inspección Geológica de EE.UU., me explicó un fascinante proyecto para trazar un mapa de corrientes oceánicas. Se hace por medio de boyas de deriva (que algunos llaman vagabundas), que transmiten sus posiciones, junto con diversas medidas de las propiedades del océano, a investigadores situados en tierra firme. Los investigadores querrían estudiar por el mismo procedimiento las aguas costeras estadounidenses, pero no desean producir contaminación y no pueden costear toda una flota de boyas de precio elevado. El coordinador del programa me preguntó si los aficionados, cuya pericia ha sido aguzada por presupuestos menguados, podrían aportar algunas ideas ingeniosas.

Así que aquí les ofrezco una ocasión para contribuir a las tareas científicas. El objetivo es proyectar un instrumento para supervisar las aguas cercanas a la costa; algo que acaso pueda construirse por unos miles de pesetas. Para que sirva de orientación, este artículo expone los requisitos y trata de los elementos materiales que pudieran resultar útiles. Pero que nadie se limite a lo que aquí se dice. Las mejores soluciones las enviaré a los departamentos oficiales correspondientes y las expondré en la página World Wide Web de la Society for Amateur Scientists. Las ideas ganadoras en este concurso informal merecerán también los laureles de aparecer en uno de los próximos artículos.

Nuestra boya vagabunda tiene que seguir las corrientes costeras durante todo un mes, informando de su posición y del estado del mar circundante. Pero no debe ser ni un peligro para la navegación ni una amenaza para la vida marina. El artefacto tiene que carecer, pues, de componentes que puedan atrapar, asfixiar, envenenar o perjudicar de cualquier manera a los organismos marinos. Sería ideal que casi todos los componentes de la boya fuesen biodegradables. También podría construirse de modo que las partes que no se descompongan rápidamente estén confinadas y se hundan enseguida hasta el fondo, donde no puedan hacer ningún daño.

Buena parte del trabajo consiste en decidir primero qué es exactamente lo que encierra algún peligro ecológico. Sólo entonces se podrá diseñar una boya de modo que sea lo más benigna posible. Téngase presente además que el instrumento tiene que ser lo bastante pequeño para no constituir un peligro para la navegación, siendo en cambio lo suficientemente visible para que nadadores, surfistas y tripulantes de lanchas puedan apartarse de él. Por último, tiene que resistir los temporales y la mar picada, moviéndose con las corrientes y no con los vientos.

Hallar elementos biodegradables requiere hacer pruebas. Los soportes de cartón puede que se empapen demasiado pronto y los flotadores hechos con latas de acero puede que se corroan con demasiada rapidez. Para retrasar esos procesos, las partes podrían recubrirse con goma laca, cera u otras sustancias naturales.



1. Una boya de deriva sencilla tendría que poder construirse por poco dinero

La figura 1 recoge mis propias ideas. Una quilla extensa y un perfil que apenas sobresale del agua impiden el vuelco de la boya y aseguran su desplazamiento con las corrientes. Para avisar a los ocupantes de las pequeñas embarcaciones hay un banderín de colores sujeto a un tubo de cartón que protege a una antena de radio.

Pero todo esto no es más que una posibilidad. Probablemente hay innumerables modos de configurar una boya vagabunda con los atributos necesarios y espero con ilusión conocer los detalles de los proyectos de los lectores. Como la boya tiene que poder percibir su posición, el estado del mar circundante y comunicar los datos, seleccionaré además otro ganador para el mejor proyecto de montaje electrónico que realice esas tareas de la forma más fiable y económica.



2. Boya de investigación desplegada por el Servicio de Gestión de Minerales estadounidense. Estuvo un mes enviando información a estudiantes e investigadores durante la primavera pasada

La cosa tiene su intríngulis, pero puede que no sea tan difícil como parece. Los satélites del GPS ("Global Positioning System", sistema de localización universal) permiten que determinar la posición sea un juego de niños. Garmin, por ejemplo, vende por menos de 200 dólares unos minúsculos receptores de GPS que pueden ubicar una boya de deriva en cualquier punto de la Tierra con un error de unos 100 metros. (Puede verse información adicional en www.garmin.com/oemTracPak.html.)

Puede que la telemetría sea lo más complicado. Las boyas de deriva desplegadas en alta mar emplean los satélites ARGOS para transmitir sus informes a las bases. Pero ese servicio es bastante caro, por lo menos hasta ahora. Por suerte para los estudios costeros, la "radiotransmisión en paquetes" proporciona una posibilidad económica. Esta técnica, iniciada por los radioaficionados hace unos veinte años, permite que dos ordenadores compartan la información sin disponer de enlace telefónico ni de Internet entre ellos. La idea consiste en partir un archivo de datos en trozos más pequeños, llamados paquetes, añadirles la información de ruta y enviarlos por las ondas. Aunque los transmisores empleados en este tipo de comunicaciones funcionan con potencias inferiores a un watt, las señales de radiotransmisión en paquetes pueden recibirse casi en cualquier punto de un país merced a redes nacionales de estaciones manejadas por aficionados (llamadas repetidores), que automáticamente reciben, amplifican y retransmiten la información hacia lugares más distantes.

La radiotransmisión en paquetes tiene otra ventaja. Gracias al imaginativo trabajo realizado por Bob Bruninga, de la Base Terrestre de Satélites de la Academia Naval de EE.UU. en Annapolis (Maryland), generar un mapa que represente continuamente todas nuestras boyas en un ordenador personal sería una tarea sencilla. Bruninga es el creador del APRS ("Automated Position Reporting System", Sistema automático de información de posición), un programa que representa gráficamente los datos recibidos sobre un mapa digitalizado y muestra la ubicación exacta de la emisora originaria, dondequiera que se encuentre. Para más información, consúltese www.aprs.org.

Para emplear la radiotransmisión en paquetes, el sistema electrónico tendrá que incluir lo que se llama un regulador de nodo terminal (TNC, "Terminal Node Controller", en la jerga radioaficionada) junto con una unidad GPS y una emisora barata. Hay al menos un TNC de calidad, el KPC-3 Plus de Kantronics (www. kantronics.com; 149,95 dólares), que puede manejar dos sensores analógicos a la vez, convertir las medidas en paquetes y transmitirlos. (Con pequeñas modificaciones puede disponerse de canales adicionales, pero hay que espabilarse, pues Kantronics no proporciona información al respecto ni anima a hacerlo.) Así la boya podría medir, por ejemplo, las temperaturas del aire y del agua, la salinidad, la intensidad de la luz solar y la tensión de la batería.

Por lo que a las emisoras se refiere, hay que buscar en las tiendas locales de radioaficionados. No faltan aparatos espectaculares ni variedad de características, pero recuérdese que al cabo de un mes, si todo va bien, la emisora estará en el fondo del océano, por lo que conviene elegir el modelo más sencillo capaz de realizar la tarea. Puede que lo más económico sea un transceptor de datos especializado (una radio que recibe y emite). MFJ Enterprises, de Starkville (Mississipi, USA; 800-647-1800), vende su modelo APRS MFJ-8621X2 por unos ciento cuarenta dólares. Ese aparato transmite información digital en una frecuencia APRS estándar. Habrá quien prefiera el modelo Radio Shack HTX-202; es más flexible y vale doscientos dólares. Ambos tienen un alcance de unos 10 kilómetros.

Recuérdese que la boya necesitará electricidad durante un mes. Que a nadie le seduzca el canto de sirena de la luz solar: los paneles fotovoltaicos, las baterías recargables y los componentes electrónicos para conectarlos suponen un aumento de la complejidad y del costo de unos 150 dólares al menos. Considérense más bien pilas alcalinas ordinarias del tipo D, que tienen cinco veces más capacidad que las recargables. Alimentando los sensores y transmitiendo su posición más o menos cada media hora, la boya debe poder funcionar durante varias semanas con seis baterías del tipo D.

Confío en que los ingeniosos lectores de esta sección someterán a la consideración de los oceanógrafos ideas novedosas. Los organismos públicos competentes desean la ayuda de los entusiastas de la ciencia; ya pueden seguirse por Internet algunas de sus boyas (examínese www.drifters.doe.gov).

Mi agradecimiento a Ellen Prager, Bob Bruninga y Joe Valencic por su ayuda y consejos. Para más información acerca de éste y otros proyectos, visite el foro de la Society for Amateur Scientists en web2.thesphere.com/SAS/WebX.cgi en la World Wide Web. Puede también escribirse a la sociedad a 4735 Clairemont Square, Suite 179, San Diego, CA 92117, o llamar al 619-239.88.07.

Ray F. Boegner

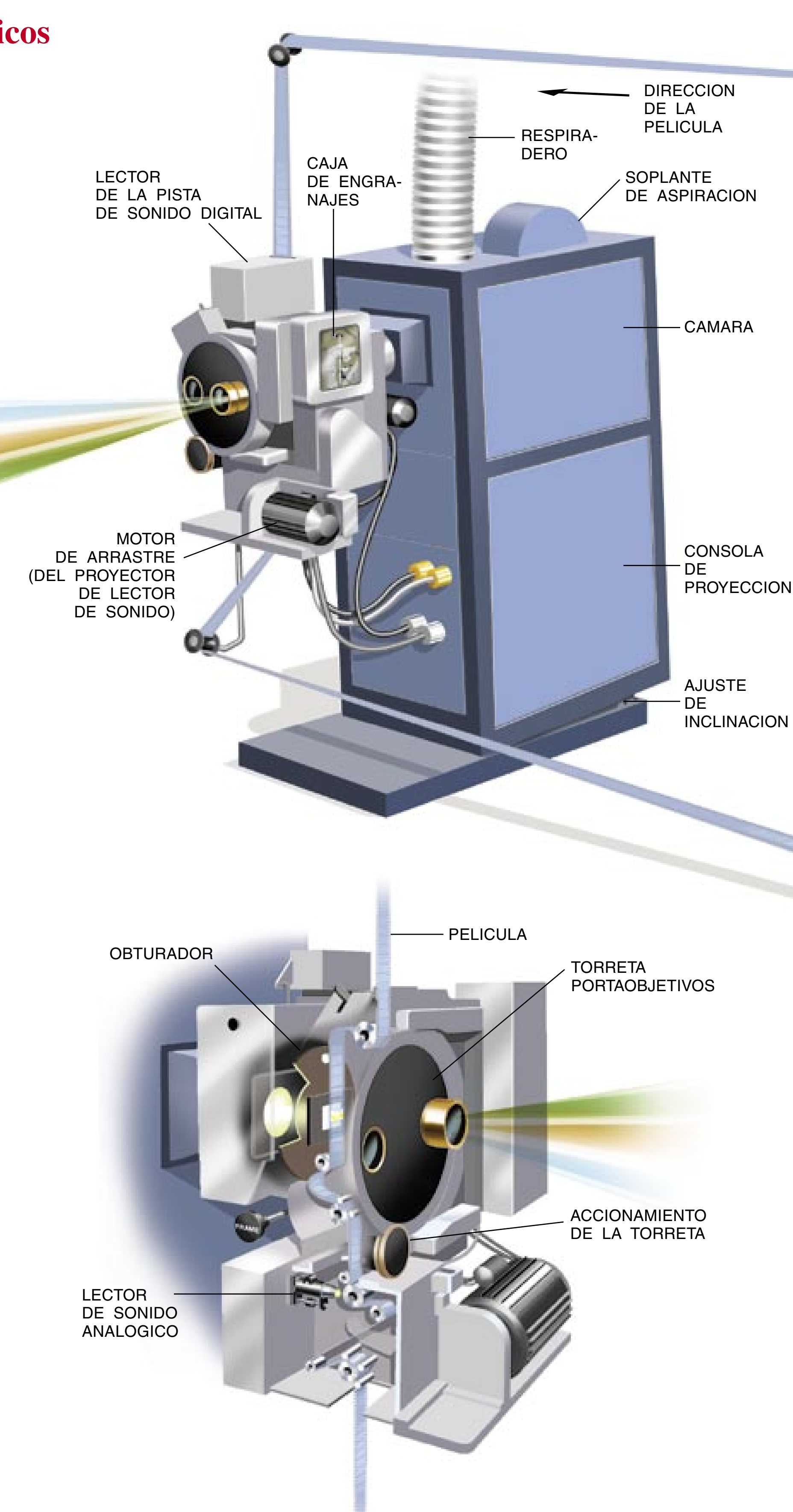
Proyectores cinematográficos

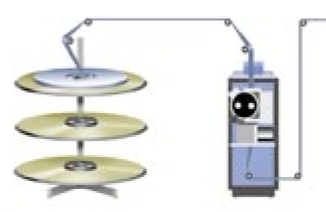
Para la mayoría, la expresión "proyector cinematográfico" evoca una máquina repiqueteante que devana una película de una gran bobina a otra gran bobina. Es una imagen que perdura y se mantiene viva gracias a la televisión y al propio cine que representan esas escenas, pese a haber desaparecido hace más de veinte años.

Desde mediados los años setenta, se emplean discos de gran tamaño, y no bobinas, como soporte de las películas. Esos sistemas de disco, inventados alrededor de 1970, presentan ventajas notables. Hacen innecesario rebobinar la película y ésta se ve sometida a tensiones mecánicas muy inferiores. La película fluye desde el centro de uno de los discos a través del proyector para ir a parar al otro disco, donde se arrolla desde el centro de ese disco hacia el borde del mismo. Al terminarse la película, al operador le basta con cambiar los discos antes de la siguiente proyección.

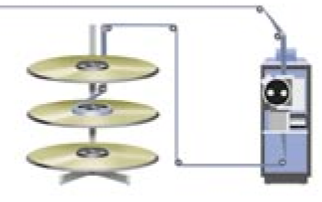
Además, un disco almacena hasta cuatro o cuatro horas y media de película (7,4 kilómetros). Así, los films pueden montarse y dejarse pasar hasta los títulos de crédito finales. Por contra, las bobinas pueden almacenar sólo un poco más de una hora de película (1,8 kilómetros); la proyección que dure más de una hora requiere dos proyectores y un operador atento que cambie al segundo proyector cuando se acabe la película del primero.

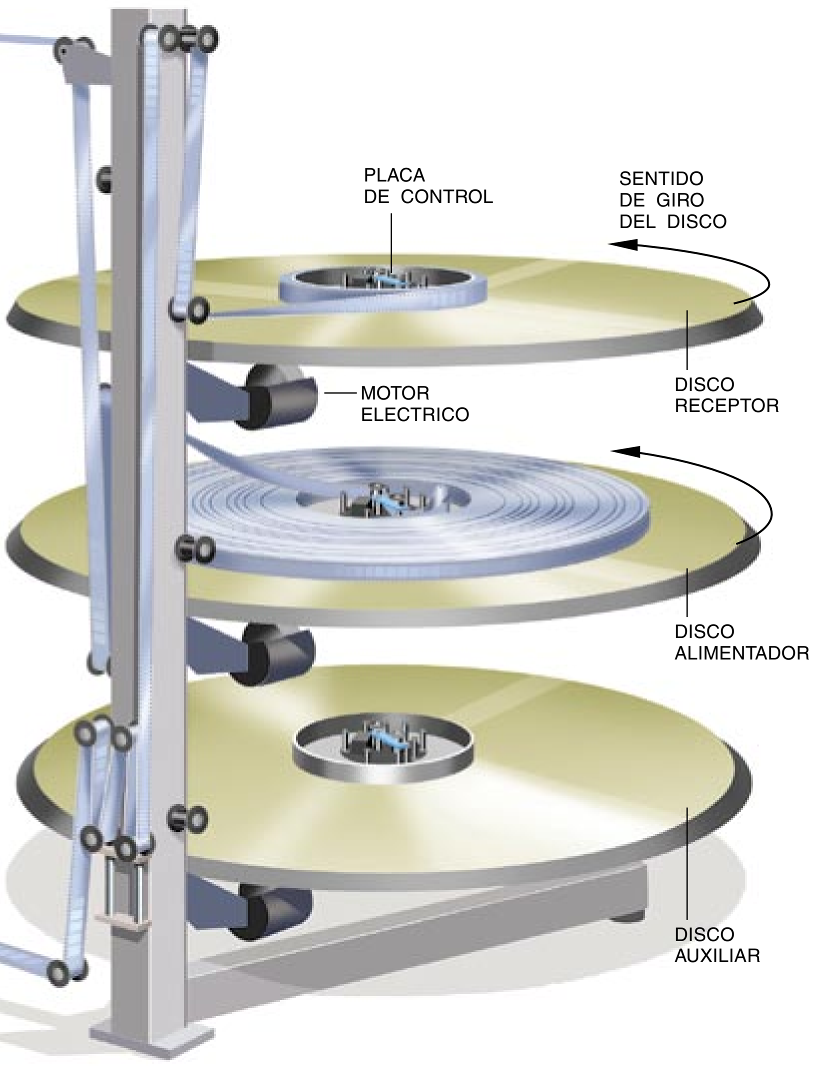
Lo que posibilitó el sistema de proyectores de disco fue el invento de la lámpara de xenón por ingenieros alemanes a finales de los años cuarenta y su posterior adaptación, en 1954, como fuente luminosa para proyecciones cinematográficas. Antes de las lámparas de xenón, los proyectores de cine empleaban lámparas de arco de carbono, cuyos electrodos de esas lámparas se vaporizaban al cabo de una horas y se cambiaban cuando el operador sustituía al segundo proyector. Por ello, antes de las lámparas de xenón, que pueden durar 2000 horas o más, fue escaso el incentivo de unos proyectores que pudieran funcionar más de una hora.



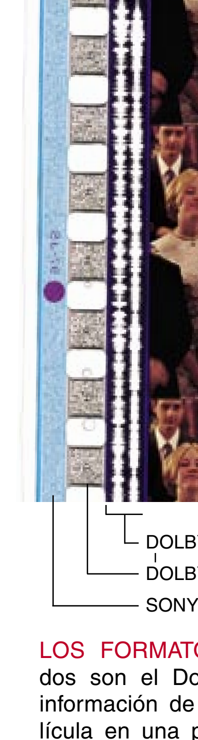


DOS PROYECTORES pueden pasar el mismo film, lo que permite proyectar en dos pantallas a la vez los grandes éxitos. Un sistema de automatismo sincroniza a los proyectores de modo que arranquen a la vez y funcionen a idéntica velocidad para que la película no se rompa.





UNA MODERNA PELICULA DE CINE es de base de poliéster y tiene 35 mm de ancho. Además de la imagen vista, la película lleva impresos uno o más formatos de audio; sólo se emplea uno por vez, según cuál sea el tipo de lector de sonido con que esté equipado el proyector y la instalación de sonido de la sala.





LA POTENCIA de esta lámpara de proyección se encuentra entre los dos mil y los cuatro mil watts; la potencia nominal de las lámparas más potentes llega a los siete mil watts. Dispone de varios ventiladores que actúan sobre ella y sobre el diafragma para disipar el enorme calor e impedir que la lámpara estalle dentro del proyector, lo que produciría unos daños considerables. Estas lámparas operan con los principios de los soldadores de arco; es decir, una corriente eléctrica continua genera un arco eléctrico de hasta medio centímetro de longitud. En torno al arco hay varias atmósferas de xenón, que es un gas inerte, con lo que se impide que los electrodos se consuman.

CATODO

ANODO

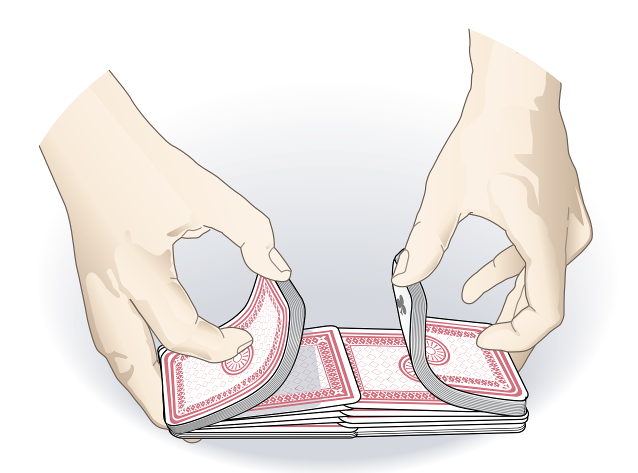
LOS FORMATOS DE SONIDO más extendidos son el Dolby SR (analógico), en que la información de audio se imprime sobre la película en una pista doble a la derecha de los fotogramas; el Dolby Digital Sound, en que la información digital de audio se imprime entre los orificios de arrastre de la película; el Sony SDDS Digital Sound, en que la información de audio digital se imprime junto a ambos bordes de la película y puede producir hasta ocho canales de sonido discretos, y el DTS, o Digital Theater Sound, en el cual un código temporal patentado (*no se ilustra*) impreso junto a la pista analógica sincroniza con la pista de sonido digital de la película, almacenada en un CD-ROM.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

Para reordenar la baraja... ¡barajar!

En casi todos los juegos de cartas lo primero es barajar. Barajar el mazo para que el orden de aparición de las cartas lo establezca el azar. Pero si se baraja con excesiva perfección, los resultados distan mucho de ser aleatorios. Vamos a fijarnos en el conocido sistema de barajadura por "peinado", en el que el mazo se corta en dos y se intercalan las cartas de las mitades.

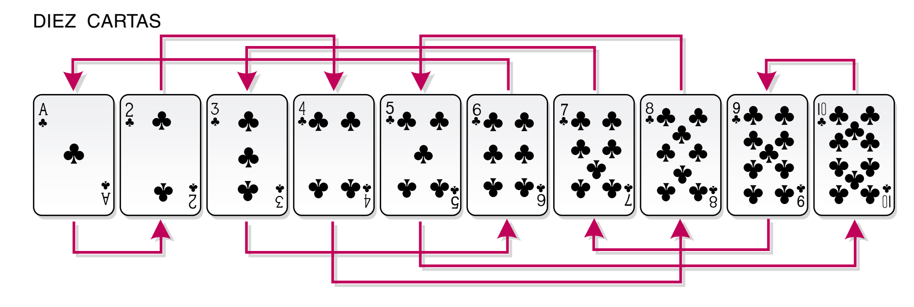


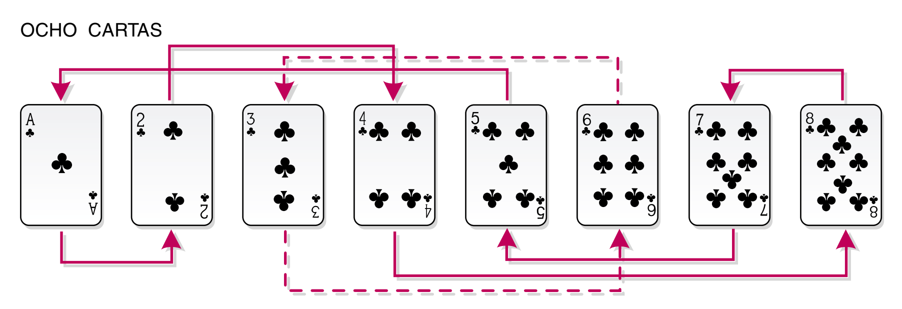
Imaginemos, por mor de simplicidad, un mazo de 10 cartas, todas del mismo palo, dispuestas en orden consecutivo, con el as en lo alto y la carta 10 en lo más bajo. Cortemos el mazo entre las cartas números 5 y 6 e intercalemos cuidadosamente las mitades. Si fuese la primera carta de la mitad superior del mazo primitivo la que acabase en lo alto del mazo barajado, el orden final sería as, 6, 2, 7, 3, 8, 4, 9, 5, 10. Y si acabase en lo alto la primera carta de la mitad inferior, el orden pasaría a ser 6, as, 7, 2, 8, 3, 9, 4, 10, 5. Diremos que el primer método es un "peinado externo"; el segundo será, pues, "interno".

La primera mención escrita de la barajadura por peinado data de 1726 y figura en un libro titulado *Whole Art and Mystery of Modern Gaming* ["Mañas y misterios de los juegos modernos"], de autor desconocido. En 1843, J. H. Green expuso la barajadura por peinado en *An Exposure of the Arts and Miseries of Gambling* ["De las artes y miserias de los juegos de azar"]. Fred Black, ranchero de Nebraska y hábil en barajar por peinado, practicaba la técnica incluso cuando iba a caballo, y elaboró buena parte de los aspectos matemáticos para las repeticiones de peinados exteriores de la llamada baraja francesa, que consta de 52 naipes. Muchos de los principales teoremas para mazos de tamaño arbitrario fueron publicados en 1957 por el ilusionista británico Alex Elmsley.

Un peinado externo puede considerarse como un peinado interno en un mazo que contiene dos cartas menos. Si mantenemos el as en lo alto de nuestro mazo de 10 naipes y la carta 10 en lo más bajo, pero realizamos un peinado interior sobre las cartas números 2 a 9, el orden pasa a ser as, 6, 2, 7, 3, 8, 4, 9, 5, 10; esto es, la misma ordenación resultante de una barajadura externa con la totalidad de las 10 cartas. Esta conexión nos permite limitarnos a considerar sólo una de las dos barajaduras.

Imaginemos que tomamos nuestro mazo de 10 naipes y que lo sometemos reiteradamente a un peinado interno. ¿Qué ocurre? ¿Acaso queda el mazo cada vez más mezclado y revuelto? Al principio parece que la barajadura introduce azar en el mazo: al cabo de tres peinados, el orden pasa a ser 7, 3, 10, 6, 2, 9, 5, as, 8, 4. Pero tras el quinto peinado, ¡el mazo queda en orden inverso! Como es obvio, al cabo de cinco peinados más, el orden original habrá "resucitado". Deducimos, pues, que el peinado interno, aplicado repetidamente a las 10 cartas, efectúa un ciclo que pasa, exactamente, por 10 ordenaciones diferentes. Este número





1. Al peinar un mazo de 10 cartas, sus ordenaciones sucesivas forman un ciclo de 10 pasos. En un mazo de 8 cartas, al barajarlas por peinado quedan reordenadas en dos ciclos

es una minúscula parte del total de 3.628.800 permutaciones en que pueden ordenarse 10 cartas.

Al ensayar el mismo procedimiento con cualquier mazo que contenga un número par de cartas, se observa que el mazo retorna siempre a su ordenación original si el peinado es reiterado un número de veces suficiente. ¿Por qué es tal repetición inevitable? La figura 1 ilustra de qué forma se mueve durante la barajadura cada una de las cartas del mazo de 10 naipes. El as, por ejemplo, pasa a ocupar el lugar del 2, el 2 se traslada a la posición del 4, y así sucesivamente. Si vamos siguiendo las flechas, observaremos que las cartas van ocupando unas el lugar de otras en el siguiente orden: as → 2 → 4 → 8 → 5 → 10 → 9 → 7 → 3 → 6 → as. En cada barajadura las cartas se desplazan un paso más a lo largo de este ciclo. Dado que cada ciclo contiene 10 pasos, al cabo de 10 peinados cada carta habrá regresado a su posición de partida.

Este mazo tiene una propiedad atípica, a saber, que existe sólo un ciclo como el explicado. El caso del mazo de 8 naipes, también representado, es más típico. Ahora los ciclos son dos: as → 2 → 4 → 8 → 7 → 5 → as; el otro es 3 → 6 → 3. El primer ciclo se repite después de seis peinados, y el segundo, cada dos. Cuando el primer ciclo ha alcanzado su primera repetición —tras seis peinados— el segundo ciclo se ha repetido por tercera vez.

Cualquiera que sea el número de cartas que integren el mazo, su movimiento por él puede ser descompuesto en cierto número de tales ciclos. ¿A qué se debe? Empecemos con una carta cualquiera y vayamos siguiendo su progresión. Dado que el mazo es finito, el naipe acabará en una posición ocupada con anterioridad. A partir de entonces, irá visitando los puestos en que había estado ya. Ahora bien, ¿podemos asegurar que cuando la carta repita por primera vez una posición anterior está ocupando precisamente su posición inicial? La respuesta es afirmativa, porque cada peinado es reversible. Para garantizar que podemos retornar hasta el principio, la primera posición repetida ha de ser la posición inicial. Por razones similares, ningún naipe puede saltar de un ciclo a otro.

Conocidos los ciclos, hay una forma sencilla de averiguar cuántos son los peinados necesarios para resucitar el orden primitivo del mazo. La longitud de cada ciclo está determinada por su número de pasos: si un ciclo tiene n pasos, cada una de las cartas del mazo retorna a su posición original al cabo de n peinados. Si un mazo tiene más de un ciclo, hay que calcular el mínimo común múltiplo de las longitudes de todos sus ciclos. Por ejemplo, supongamos que un mazo tiene dos ciclos, el primero de los cuales se repite al cabo de 10 pasos, y el segundo, después de 14. Las cartas del primer ciclo retornan a sus posiciones originales en los peinados números 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, y así sucesivamente. Las cartas pertenecientes al segundo ciclo lo hacen en los peinados números 14, 28, 42, 56, 70, y así sucesivamente. El primer número que figure en estos dos conjuntos, que es el mínimo común múltiplo de 10 y 14, es 70. Por esta razón, en el septuagésimo peinado todas las cartas habrán regresado a sus posiciones originales.

Las barajaduras por peinado acabarán siempre haciendo resucitar la ordenación original, por grande que sea el mazo. Ahora bien, ¿existirá alguna relación entre el número de peinados requeridos y el número de cartas del mazo? La propiedad del

PARA 10 CARTAS

EXPONENTE (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
POTENCIA DE 2 (2^n)	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024
RESTO DE $2^n/(10+1)$	2	4	8	5	10	9	7	3	6	1

PARA 8 CARTAS

EXPONENTE (n)	1	2	3	4	5	6
POTENCIA DE 2 (2^n)	2	4	8	16	32	64
RESTO DE $2^n/(8+1)$	2	4	8	7	5	1

2. El número de peinados internos requeridos para restaurar el orden de un mazo se calcula dividiendo las potencias sucesivas de 2 hasta que el resto sea igual a 1

Acuse de recibo

En ¡Qué coincidencia! [número de julio del año pasado] sugería yo que la aparición del número 253 en dos problemas distintos concernientes a coincidencias en cumpleaños era, a su vez, una coincidencia. Pero, como varios lectores me han hecho notar, no es así. El primer problema decía: "¿Cuántas personas deberían reunirse en una sala para que lo más fácil sea que haya al menos dos con el mismo cumpleaños?" La respuesta es 23 personas, entre las cuales hay 253 posibles emparejamientos. El segundo problema era: "¿Cuántas personas, además de uno mismo, ha de contener la sala para que lo más probable sea que alguna otra tenga el mismo cumpleaños que usted?" La respuesta vuelve a ser 253. Los cálculos de que me serví para llegar a estas respuestas no parecen guardar relación, pero Joseph Gerver se percató de que están concatenadas por una aproximación.

La probabilidad de coincidencia en el segundo problema es $1-(364/365)^n$, siendo n el número de personas de la sala, descontado uno mismo. La coincidencia se vuelve más que probable cuando su probabilidad supera el valor 1/2 —lo que sucede cuando n llega a ser 23. La probabilidad de la coincidencia en el primer problema es $1-(364/365)\times(363/365)\times\ldots\times(365-m+1)/365$, siendo m el número total de personas de la sala. Cuando m es mucho menor que 365, el valor de $(365-m)/365$ es aproximadamente igual al de $(364/365)^m$. En tal caso, la fórmula de la probabilidad puede ser escrita como $1-(364/365)^{1+2+\ldots+m-1}$.

La comparación de las dos fórmulas deja ver que las dos probabilidades serán aproximadamente iguales cuando $1+2+\ldots+m-1$ ronde en torno a n. El número de emparejamientos entre m personas es $m\times(m-1)/2$, que es igual a la suma $1+2+\ldots+m-1$. Así que el número de emparejamientos del primer problema tiene que ser aproximadamente igual al número de personas del segundo. *—I. S.*

mazo de 10 cartas, que recupera su ordenación al cabo de 10 peinados —el número de cartas del mazo—, no es típica. De hecho, los mazos de 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 y 24 cartas requieren, respectivamente, 4, 3, 6, 10, 12, 4, 8, 18, 6, 11 y 20 peinados internos para restaurar en ellos la ordenación original. Existe una regla de formación, pero hay que ser experto en teoría de números para descubrirla.

Tomemos el caso de 10 cartas. En la figura 2 se dan las potencias sucesivas de 2 y los restos que se obtienen al dividir entre 11 cada una de ellas (que es el número de cartas, más uno). El resto es 1 para la décima potencia de 2 —y el número de peinados necesarios para resucitar la ordenación es 10—. Cuando el mazo tiene ocho naipes, se toman los restos obtenidos al dividir entre 9 las sucesivas potencias de 2. Se obtiene el resto 1 para la sexta potencia y, por ello, el número de peinados internos necesarios para resucitar un mazo de 8 naipes es seis.

Esta regla es válida en el caso general. El número de pasos necesarios para obtener un resto igual a 1 es siempre igual al número de peinados internos necesarios para restaurar la ordenación del mazo. Y este número será siempre menor o igual que el número de cartas del mazo. Dado que un peinado externo es lo mismo que un peinado interno en un mazo con dos cartas menos, para los peinados externos es válida una regla similar, pero ahora hay que dividir las potencias de 2 por el número de cartas, menos 1.

Cuando el mazo es la baraja completa de 52 cartas, la recuperación de la ordenación original exige 52 peinados internos. Sin embargo, con 8 peinados externos es suficiente. Este resultado, empero, es difícil de poner de manifiesto: incluso a los talladores más diestros les resulta difícil efectuar un peinado exacto, en el que las cartas queden perfectamente intercaladas, y efectuar varios peinados impecables seguidos es proeza casi imposible. Más fácil es proceder retrógradamente: se reparte el mazo como si fueran sólo dos los jugadores, y se apilan sus manos una sobre la otra. El inverso de un peinado interno se llama reparto interno, y el inverso de un peinado externo es un reparto externo. El número de pasos necesarios para que resucite la ordenación original del mazo es el mismo tanto al peinar como al repartir.

NEXOS

James Burke

Ostras

Resulta siempre agradable sacar del olvido figuras que no han recibido merecido reconocimiento. A este propósito, y a través de mis lentes de lectura, topé con el nombre de alguien que, en la intimidad de sus últimos años, debió decir más de una vez "¡Ostras!". Se llamaba Chester Moor Hall. ¿Quién? De acuerdo, intentémoslo de nuevo. John Dollond. ¡Eso es! ¿El que inventó las lentes acromáticas ópticamente puras en 1757? Pues no. Hall ya las había inventado años antes.

Un tipo simpático, este Hall, que como muchos que lo son termina siempre el último. Hacia 1729, estudió la posibilidad de fabricar lentes que no ofrecieran imágenes borrosas y coloreadas, para atender la más que justificada queja de los astrónomos. No en vano, por esta causa, hablaban de "planetas con orejas" (en referencia a Saturno) y otras zarandajas. Hacia 1733 Hall acopló lentes de distinta densidad y consiguió que las diferentes dispersiones se cancelaran entre sí. ¡Bingo! Claridad total, lentes acromáticas, márgenes nítidos, sin color. Tras fabricar un par de telescopios para sus amigos, se olvidó del experimento y pasó a ocuparse de sus tierras como magistrado en Essex. No volvió sobre el tema, ni siquiera cuando le llegaron noticias de que un tal Champness sostenía haber dado con la solución antes que Dollond. El trabajo de Chester Moor Hall aún tardará cien años en aparecer en un documento de la Regia Sociedad y sólo para que se archive y olvide de nuevo. Habrán de transcurrir otros 165 años hasta llegar a mí. Pero imagino que ya no es ninguna novedad que no estoy a la vanguardia de la investigación histórica.

Volviendo a John Dollond, recordemos que pasó al mundo de la óptica desde la seda (la familia d'Hollande, de origen neerlandés, se había dedicado en un comienzo a la manufactura textil). Ayudado por su hijo, abre un comercio en Piccadilly, Londres, y amasa una fortuna fabricando instrumentos para la clase pudiente. A su muerte lega a sus herederos las patentes de sus muchos inventos, entre ellas la de las lentes acromáticas. Hay en la familia un afortunado, Jesse Ramsden, que saltó de aprendiz a yerno al casarse con su hija Sarah.

A Ramsden este matrimonio le vino caído del cielo. En sus manos tiene las lentes. Además, resulta ser un portento con el metal, sobre todo en lo que se refiere a grabar muescas; grados, minutos de arco, esas cosas. Fabrica mil sextantes para la marina británica y exploradores particulares. El sello distintivo de sus instrumentos radica en la fina exactitud. Cuanto más precisas sean las marcas en un instrumento de medición, más preciso es lo que se mide, sea lo que sea. En el caso de los navegantes, tener un sextante de Ramsden significaba contar con mejores posibilidades de esquivar los escollos.

Siempre que se supiera dónde estaban los escollos, claro está. Y éste era un tipo de conocimiento que aún no estaba muy difundido en una época en que la Revolución Industrial estimulaba la importación de materias primas a precio de saldo desde las colonias y la exportación de manufacturas en el sentido inverso. Todo lo que tenían que hacer los británicos para facilitar el negocio era promulgar leyes que obligaran a los colonos a restringir el comercio a este tipo de intercambio con la madre patria. Y además utilizando sólo barcos británicos. Se esconde aquí una de las razones por las que los Estados Unidos hoy son los Estados Unidos. Aun así, el negocio se prolongó lo suficiente en otras partes (India, Africa) como para financiar los museos que los turistas pueden visitar ahora en Gran Bretaña. Por este motivo, muchos barcos con las bodegas repletas se afanaban en sus trayectos de ida y vuelta y terminaban en el fondo del mar con una frecuencia mayor de lo que sería deseable (obvio es decir que por culpa de esas rocas a las que hacíamos referencia). Así se explica que se impusiera la moda de construir faros. El problema a finales del siglo XVIII no se centraba en levantar el edificio, una labor sencilla desde los tiempos de Faros, sino en la iluminación. Velones que sólo se veían cuando ya era demasiado tarde.

Puesto que se trataba de un asunto determinante, algo se hizo. Gracias a las muescas famosas de Jesse Ramsden. En este caso indicadas sobre un teodolito gigante de más de un metro de altura, pilar cartográfico de Irlanda. Admitido, por supuesto, que el equipo de cartógrafos supiera hacia dónde tenían que dirigir el teodolito, una tarea complicada en la oscuridad propia del Ulster. Pero la iluminó la aparición de un joven militar llamado Thomas Drummond, con un invento de esos cuyo nombre en seguida se hace popular. Consistía en un chorro de hidrógeno y oxígeno en combustión dirigido a una pequeña bola de cal, cuya incandescencia se reflejaba en un espejo parabólico. Y, voilà, un foco. Candilejas de teatro, fue también una ven-



tura para cartógrafos y marineros en busca de escollos, pero algo menos cuando se acababa el gas.

Hacia 1849 el profesor belga Floris Nollet podía fabricar todo el gas que hiciera falta mediante electrólisis. Pónganse un electrodo positivo y uno negativo en agua; la corriente entre ambos disociará el agua en hidrógeno y oxígeno. Problema resuelto, siempre y cuando los faros no se queden sin fluido eléctrico, que también puede suceder. Otros avances permiten que en 1871 un colaborador de Nollet, Zénobe Théophile Gramme, invente la dinamo. Los solenoides giran en un campo magnético y generan electricidad, la suficiente para producir luz de arco voltaico. Dos cabos de carbono casi rozándose. A medida que el fluido eléctrico que recorre los filamentos salva ese hiato, saltan chispas y las puntas del carbono se ponen incandescentes. En comparación con la luz así generada, diríase que las candilejas de antes se han apagado. Este dispositivo prepara el camino para el horno de arco eléctrico, en el que dos electrodos de carbono permiten una cantidad de calor enorme.

En 1892, un francés pensó que podría crear diamantes artificiales si conseguía calentar hierro y azúcar carbonizado a temperaturas suficientemente altas como para que el carbón se disolviera en el hierro. Luego, bastaría con enfriar rápidamente el hierro con agua, de forma que se solidificara a una presión altísima y se formaran partículas microscópicas de carbono. El inventor del horno se llamaba Henri Moissan. El hubiera preferido comerciar con diamantes sintéticos, pero resultó que no lo eran.

Nadie se preocupó mucho por estas minucias, porque el horno de arco eléctrico sacudió de la modorra a la comunidad científica. En 1894 Moissan mezcló cal y carbono y calentó la mezcla a dos mil grados Celsius. La sustancia resultante no parecía tener gran interés hasta que la mezcló con agua y se liberó un gas. Resultó ser acetileno, que tampoco presentaba mayor interés hasta que lo quemó. En comparación con la luz así generada, la luz de arco eléctrico parecen tinieblas. Hacia 1899 hay una proliferación de centrales de acetileno, la mayoría de ellas en lugares como las cataratas del Niágara, los Pirineos, Noruega y Suiza, donde los saltos de agua generaban la electricidad que precisaban los hornos. Pero la llegada de Thomas Edison acaba con el incipiente mercado de acetileno.

En 1912, los fabricantes de acetileno se afanan por encontrar alguna otra aplicación. En Frankfurt, un químico de Greisheim Electron busca una sustancia con la que impermeabilizar alas de aeroplano y prueba sin éxito una mezcla de acetileno, ácido clorhídrico y mercurio. Cuando coloca la plancha junto a una ventana, al sol, observa el desarrollo de una capa cremosa que luego solidifica. Rellena la solicitud de patente y se olvida de ella, hasta que en 1925 la patente caduca. Concluimos como empezamos, con alguien cuya exclamación favorita debe haber sido "¡Ostras!". Se llamaba Fritz Klatte y el material que despreció resultó ser cloruro de polivinilo, el PVC.

LIBROS

Noventayocho

Problemas de fondo

ESPAÑA EN 1898, por Pedro Laín Entralgo, Carlos Seco Serrano y otros. Círculo de Lectores; Barcelona, 1998.

Comenzó nuestro siglo XIX con un manojo de desventuras: hambre y peste, el desastre naval de Trafalgar, la guerra de la Independencia, tan honrosa como destructiva, y el mazazo final: la emancipación americana. Terminó aquel siglo con otra galería de desventuras bastante similares a las anteriores; no hubo epidemias, pero sí desastre naval y la pérdida de los restos del que había sido el mayor imperio que había conocido la historia. Entre ambos sucesos, un siglo preñado de dramáticos avatares, que pareció encauzarse con la Restauración, que trajo una paz, aunque superficial, y la superación de pronunciamientos militares mediante el triunfo del civilismo, de la legalidad constitucional patrocinada por Cánovas del Castillo.

Parecía existir motivos para un razonable optimismo hacia el 1890, pero seguían existiendo problemas de fondo que no tardarían en salir a la superficie: problemas regionalistas agudos, que para un espectador avisado se revelaban en el maximalismo de las Bases de Manresa, en la intransigencia de las provincias forales, que al fin consiguieron romper la unidad contributiva arrancando al gobierno central unos *conciertos* muy sustanciosos; desequilibrios enormes entre unas masas analfabetas y una brillante minoría de alto nivel cultural; entre unas regiones interiores deprimidas y una periferia activa, progresiva, pero no tanto que rescatara el atraso industrial de España; retraso creciente, puesto que el PNB español crecía sólo el 1,1 anual, mientras los países más industrializados crecían el 1,5. O sea, que España, englobada en el conjunto occidental, se alejaba cada vez más del Tercer Mundo, pero perdía peso dentro de dicho conjunto.

La clase dirigente, el público en general, no era consciente de estos problemas, no apreció su gravedad hasta que, bruscamente, salieron a la superficie. Fue la *crisis del 98*, tema hoy de especial interés. El Círculo de Lectores ha tenido la feliz iniciativa de agrupar en un volumen una serie de trabajos de especialistas que examinan los problemas ligados a dicha efemérides tanto en su vertiente política como en el aspecto cultural de lo que se ha dado en llamar, no sin reticencias, la *generación del 98*; aspectos ambos no disociables, porque una característica de aquellos hombres fue hacer una literatura *comprometida*, diríamos hoy, no acaparada por un esteticismo insensible a las realidades que vivía el país.

En total son diez los trabajos que integran este libro, agrupados en un Prólogo, que, sin duda, es lo más valioso del volumen, en el que los profesores Laín Entralgo y Seco Serrano analizan el panorama finisecular español, las hondas raíces de sus problemas y sus consecuencias. Bajo el epígrafe «Ciencia, Arte y Literatura» se agrupan un estudio de José Luis Abellán sobre el krausimo, considerado como el origen del pensamiento racional y científico, sesgo radical frente a las anteriores concepciones educativas; otro de L. F. Díaz Larios sobre «Creación Literaria» y un esbozo de Santiago Alcolea que lleva por título «La evolución del arte en vísperas del 98».

La cuestión central (o, al menos, la más llamativa), la pérdida de las colonias, es abordada por Miguel Alonso y Julián Companys en páginas densas y claras. Echo de menos, sin embargo, una visión más completa de la situación interior en Cuba, Puerto Rico y Filipinas. Se cierra el volumen con trabajos de Laín, Carlos Seco, García Delgado, Juan Carlos Jiménez y María Cruz Seoane acerca de diversos aspectos que ponen de relieve la reacción del país, no tan negativa como sugirió Silvela en su famoso artículo «Sin pulso». El *Desastre* fue ocasión, no desaprovechada, para un necesario examen de conciencia, punto necesario de partida para la recuperación ulterior. En resumen, un libro ameno y lleno de enseñanzas.

ANTONIO DOMÍNGUEZ ORTIZ

Ciencia medieval

Compleja linearidad

ASTRONOMIES AND CULTURES IN EARLY MEDIEVAL EUROPE, por Stephen C. McCluskey. Cambridge University Press; Cambridge, 1998. **SCIENCE IN MEDIEVAL ISLAM**, por Howard R. Turner. University of Texas Press; Austin, 1998. **PERSPECTIVES ARABES ET MÉDIEVALES SUR LA TRADITION SCIENTIFIQUE ET PHILOSOPHIQUE GRECQUE**. Dirigido por A. Hasnawi, A. Elamrani-Jamal y M. Aouad. Institut du Monde Arabe. Peeters; Leuven, 1997.

MAGIC AND DIVINATION IN THE MIDDLE AGES, por Charles Burnett. Variorum-Ashgate Publishing; Aldershot, 1996. **THE *LIBER ARISTOTILIS* OF HUGO OF SANTALLA**. Edición preparada por Charles Burnett y David Pingree. The Warburg Institute. Londres, 1997.

BEFORE SCIENCE. THE INVENTION OF THE FRIARS' NATURAL PHILOSOPHY, por Roger French y Andrew Cunningham. Scholar Press; Aldershot, 1996.

TEXTS AND CONTEXTS IN ANCIENT AND MEDIEVAL SCIENCE. Dirigido por Edith Sylla y Michael McVaugh. Brill; Leiden, 1997. **JOHANNES DE MURIS, *DE ARTE MENSURANDI***. Edición preparada por H.L.L. Busard. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 1998.

Sin la menor duda, uno de los campos más vivos de la historia de la ciencia es el período medieval. Cual filón inagotable aparecen de continuo comentarios y ediciones de su epicentro, el renacimiento del siglo XII, así llamado porque, a imagen del sextodécimo, recorre las venas de Europa una fiebre sedienta de saber. Un afán que venía de lejos, pues, como razona Stephen C. McCluskey en *Astronomies and Cultures in Early Medieval Europe*, sólo se desea lo que se estima valioso. Y esa conciencia se forjó en las supuestas tinieblas de la alta Edad Media.



Curso del Sol, según un manuscrito carolingio

McCluskey identifica, en un rastreo exhaustivo, cuatro líneas de astronomía altomedieval anteriores a la recuperación del pensamiento de Ptolomeo. División cuatripartita que encarna la respuesta dispar dada a cuestiones de principio. ¿Se basa la astronomía en la observación o se sirve de técnicas matemáticas para predecir los fenómenos? Si usa cálculos, ¿se apoya en modelos geométricos y trigonométricos o en modelos aritméticos? ¿Traza el movimiento continuo de los cuerpos o determina la frecuencia de los acontecimientos? ¿Ocurren éstos una sola vez al año o al mes y, por tanto definen un calendario? ¿De qué cuerpos celestes se ocupa la astronomía, de las estrellas, el Sol, la Luna o los planetas? Según se apliquen esos criterios, sabremos de qué tradición astronómica estamos hablando.

La primera tendencia reasume la partición del año en ocho fracciones iguales, fundada en la observación del orto y ocaso solar. La división entre solsticios y equinoccios, indicada por los monumentos megalíticos británicos, implícita en el calendario druida de Coligny y superviviente en las tradiciones populares celtas, es recogida por los altomedievales para fijar la celebración ritual y calendárica de fiestas y efemérides.

Día central de su vida comunitaria era la celebración de la Pascua. En torno a su cómputo se configura la segunda tradición. Las fechas del plenilunio pascual y del domingo de Resurrección se calculaban mediante una simple aritmética en el marco del año juliano, el mes lunar y la semana. Ni aquí ni en la corriente precedente se requería ningún sistema astronómico de referencia. Para el cálculo aritmético podía prescindirse de la geometría de las esferas y los círculos celestes; bastaba con atender a la duración media del año solar y del mes lunar.

La tercera tradición astronómica se ejercitaba en la observación del paso del sol durante el día y del curso de las estrellas durante la noche. Giraba también en torno a un tiempo ritual. En los monasterios, centros de transmisión del saber desde el siglo IV al siglo X, el cómputo del tiempo resultaba decisivo para regular el trabajo en común, la mesa compartida y, sobre todo, la plegaria conjunta, que ocupaba buena parte de la jornada y la noche. Juan Casiano trajo al monaquismo occidental las prácticas de observación astronómica que había conocido en los cenobios del Bajo Egipto. Pero quien articula esa tendencia fue el *De cursu stellarum* de Gregorio de Tours (segunda mitad del siglo VI), cuya división de la luz del día en el mes de diciembre, de cuño mediterráneo, es el punto de arranque. Consta de nueve horas; va sumando una por mes hasta junio, cuando perdura quince horas, para ir decreciendo hasta diciembre. Para un mayor ajuste horario nocturno, los monasterios del siglo nono empezaron a utilizar clepsidras, o relojes de agua.

Por fin, la cuarta tradición, geométrica, aportaba un marco explicativo del cosmos. Se inscribe esa tendencia en la profundización de las artes liberales, en particular de las científicas recogidas en el *quadrivium*. No sólo pergeñaba una cosmología geocéntrica cualitativa, sino que buscaba también técnicas cuantitativas para calcular las posiciones de las estrellas, el Sol, la Luna y los planetas. En la educación liberal, el ideal de ciencia, por su naturaleza (cuerpos celestes) y su poder predictivo (modelos geométricos), lo constituía la astronomía.

Desde el siglo octavo los árabes estaban familiarizados con la astronomía griega e hindú. Numerosos escritos difundieron los fundamentos teóricos y empíricos. La mayoría superaban el nivel de los calculistas y observadores latinos. Además supieron aplicar teorías y datos a la construcción de astrolabios y otros instrumentos de determinación del tiempo. Los resultados de ese empuje se reflejan de un modo general en *Science in Medieval Islam* y, más detallado, en las colaboraciones de *Perspectives arabes et médievales sur la tradition scientifique et philosophique grecque*.

Herederos de las culturas de Grecia y Roma, de Bizancio, Asia y Africa, los musulmanes conservaron mucho y transformaron no poco. A los tres años de la muerte de Mahoma, en el 632 d.C, tras asegurarse el control de Arabia, se introdujeron en territorios de los imperios bizantino y sasánida. En menos de un siglo su ley se imponía de Oriente Medio a la península Ibérica y en buena parte del subcontinente indio. Aunque hubieron de moldear una sociedad multiétnica, no les fue difícil. La *hadith*, canon sacro, fomentaba el unificador deseo de saber: "A quien persigue el camino del conocimiento Dios le enseñará la vía del Paraíso."

Las obras de Pitágoras, Sócrates, Platón, Aristóteles, los Estoicos y Epicuro, Euclides y Arquímedes, Hipócrates y Galeno, Dioscórides y Ptolomeo y muchos más constituyeron en el transcurso de dos siglos de traducción la base del pensamiento científico y filosófico musulmán. La flexibilidad del árabe facilitaba esa vía transmisora. Se crearon bibliotecas y centros, lo mismo en Oriente que en Occidente, a imagen de la "casa de la sabiduría" (*Bayt al-hikma*) en el Bagdad abásida. Pegada a la mezquita yacía la *madrasa* o escuela.

Traductores excelentes fueron Hunayn ibn Ishaq y Thabit ibn Qurra. Con al-Kindi se inicia la creación propia. Tendió puentes entre razón y fe, impulsó la traducción de Aristóteles y alcanzó un dominio notable en matemática, óptica y cosmología. Abu Nasr al-Farabi, el segundo maestro, se esforzó por reconciliar Platón con Aristóteles. En su *Kitab ihsa al-ulum* ("Catálogo de las ciencias") concede la primacía a la filosofía por ser garante de la verdad del conocimiento. Las disciplinas enseñadas tenían una jerarquía. El rango más elevado lo ocupaban las ciencias religiosas (teología, derecho, dialéctica, interpretación de los sueños, filología; es decir, cuanto ayudaba interpretar el Corán). Venían luego las ciencias filosóficas, empezando por la lógica aristotélica, física, medicina, alquímica, agronomía. A continuación, la metafísica. Por fin, matemática y sus partes componentes, álgebra, cálculo, geometría plana y esférica, óptica y astronomía.

La matemática árabe integra elementos hindúes en una matriz arquimediana. Distingue Roshdi Rashed en *Perspectives arabes et médievales* entre el Arquímedes auténtico y el Arquímedes medieval, o, mejor, el Arquímedes de la antigüedad y el Arquímedes de la Edad Media. Este último, por lo que al mundo latino se refiere, fía en la versión de Guillermo de Moerbecke. No es el mismo que el de las leyendas surgidas en torno a su figura, de poderosa eficacia científica. Así, la de los espejos ustorios, según la cual Arquímedes habría incendiado la flotilla de Marcelo ante Siracusa. La leyenda, que no se remonta más allá del siglo VI, incitó la investigación catóptrica; primero en Bizancio con Antemio de Tralles y Dídimo; luego, en Bagdad con al-Kindi y, más tarde, con Ibn Sahle Ibn al-Haytham. Tal investigación fue esencial para el descubrimiento de la ley de Snell y para el desarrollo de la teoría de las cónicas. Vitrubio y Didimo recogen la leyenda según la cual Arquímedes habría encontrado un método para verificar si la corona de Hieron era de oro puro. El relato promovió el estudio de pesos específicos y sirvió de referencia para la elaboración de métodos hidrostáticos, como los que se encontrarán más tarde en al-Biruni y al-Khayyam.

En el Bagdad del siglo IX comienza la larga tradición de matemática arquimediana con la versión al árabe de *La medida del círculo* y *La esfera y el cilindro*. El filósofo al-Kindi comentó la tercera proposición de *La medida del círculo* (la aproximación de π). Pero el acta fundamental la firman contemporáneos de al-Kindi, los tres hermanos Muhammad, Ahmad y al-Hasan, los "hermanos Banu Musa", a quienes se debe *El conocimiento de la medida de las figuras planas y esféricas*. Los Banu Musa no siguen a ciegas las directrices de Arquímedes. En ese mismo tratado de 18 proposiciones, estudian cuatro temas: la medida del círculo, la de la superficie lateral de la esfera, el volumen de la esfera, la fórmula de Herón de Alejandría del área del triángulo y, por último, la cuestión de las dos medianas y la trisección del ángulo.

Los árabes hicieron también amplio uso del tratado geométrico de las *Cónicas* de Apolonio. En ocho libros presentaba éste la teoría de las cónicas, la parábola, la hipérbola y la elipse, definidas como secciones planas de un cono de revolución. Se han conservado en griego los libros I-IV; los restantes (V-VII) sólo son conocidos por la tradición árabe, que nos ha transmitido la traducción de los libros I-VII realizados en el siglo IX en Bagdad. El Libro VIII, consagrado a problemas cónicos, se ha perdido. En otra fuente del saber matemático, la euclideana, destacaron los matemáticos hebreos, que tradujeron a su lengua los *Elementos*, *Datos, Optica* y el *Libro de los espejos*, pseudoeclideano que no debe confundirse con la *Catóptrica*.

Aunque el título de comentarista por antonomasia de Aristóteles recae en Ibn Rushd, nuestro Averroes, obligado es conocer quién le precedió en la tarea. Paul Lettinck desempolva la labor del zaragozano Ibn Bagga. Glosó éste los *Físicos, Sobre la generación y corrupción, Meteorología, Sobre el alma, Libro de los animales, Libro de las Plantas*. Escribió también sobre tratados lógicos del estagirita, aunque fueron en realidad comentarios a los comentarios de al-Farabi. Ibn Rushd lo estudia, cita extractos, adopta algunas de sus ideas y rechaza otras. Un caso famoso es el del movimiento de un cuerpo a través de un medio fluido (agua o aire). Ese movimiento decelera (en comparación con el movimiento en el vacío) debido a la resistencia que le opone el medio. Ibn Bagga propuso una teoría discordante de Aristóteles, en cuya defensa sale Ibn Rushd. La cuestión desencadenó discusiones sin cuento a lo largo de la Edad Media hasta Galileo.

Fue el curso del Ebro uno de los focos centrales del Renacimiento de la ciencia en el siglo XII. Charles Burnett nos ofrece una panorámica parcial en *Magic and Divination in the Middle Ages* y en *The* Liber Aristotilis *of Hugo of Santalla*, este último en colaboración con David Pingree. Los artículos incluidos en *Magic and Divination* se proponen demostrar que ambas desempeñaron una función central en la sociedad medieval. Para Burnett, el deseo de adquirir el "conocimiento secreto" de la magia y la adivinación catalizó la actividad traductora del árabe al latín en la España del siglo XII.

El estudio medieval de las siete artes liberales, explicadas en el *Heptateuchon* de Thierry de Chartres, había cuestionado en más de una ocasión su contenido real. Pedro Alfonso, judío converso, que tradujo textos científicos árabes y promovió el estudio de la astronomía en los primeros decenios del siglo XII, consideraba que las seis primeras artes eran la dialéctica, aritmética, geometría, medicina, música y astronomía. Por lo que concierne a la séptima, anotó: "quienes admiten la posibilidad de la profecía la llaman necromancia; quienes la rechazan, filosofía... y los que no estudian filosofía dicen que la gramática."

Hacia mediados del siglo XII el ábaco comenzó a ser sustituido por un método de cálculo con números arábigos escritos directamente en un tablero cubierto de arena o en pergamino. Este era el algoritmo, tomado de *Sobre el cálculo indio* de al-Khwarizmi, Los números arábigos presentaban un aura mágica. Y durante siglos se consideraron un código secreto. La introducción del algoritmo epitomiza el cambio operado en el proceso de transmisión de la ciencia árabe. No se olvide que a principios del siglo XII, Ibn Abdun, de Sevilla, había prohibido vender libros a los judíos y los cristianos, porque traducen y divulgan sus contenidos.

Esa norma se rompe en el círculo de Miguel, obispo de Tarazona desde 1119 hasta 1151. Vecino árabe del prelado era el último de la dinastía de los Banu Hud de Zaragoza, Sayf al-Dawla. Tras la caída de Zaragoza en manos cristianas en 1118 los Banu Hud se asentaron en Rueda de Jalón. Allí instalaron su magnífica biblioteca, de la que Miguel escogió algunos volúmenes para que los tradujera Hugo de Santalla. Cuenta éste en el prefacio a un comentario sobre las tablas de al-Khwarizmi que el manuscrito fue encontrado entre los “secretos más recónditos de la librería”. Con ello Hugo da a entender que se está introduciendo en un mundo hermético, digno de manifestarse sólo a quienes sean merecedores.

Hugo subsume el prefacio de la fuente árabe en su propio prefacio, por lo que resulta a veces difícil distinguir lo propio de lo copiado. En el prólogo al *Centiloquium* (aforismos astrológicos) del pseudo-Ptolomeo, exhorta a Miguel a no dejar los secretos de tanta sabiduría en cualquier mano. En otro prefacio dice que se ha esforzado por hallar entre los árabes las cuatro especies de adivinación mencionadas por Isidoro de Sevilla: la adivinación por tierra, agua, aire y fuego. Al encontrar la “ciencia de la arena” árabe cree que ha descubierto la geomancia de Isidoro, y promete buscar y traducir las demás “mancias”.

El *Liber Aristotilis De ducentis LVque Indorum voluminibus universalium questionum tan genetialium quam circularium summam continens* (“Libro de Aristóteles que contiene todas las cuestiones genetialógicos y revolucionarias extraídas de los 255 volúmenes de los hindúes”) vertido por Hugo, que en edición crítica presentan Burnett y Pingree, es un texto astrológico árabe sobre nacimientos y aniversarios, cuyo autor fue probablemente Masha’allah. El comentario aporta las traducciones inglesas de los pasajes paralelos tomados de otra fuente basada en el texto de Masha’allah, el *Libro de los nacimientos* de Sahl b. Bishr. El volumen concluye con un índice de las fuentes mencionadas y otro de materias.

De acuerdo con el título su material está extraído de 255 volúmenes. En un prólogo tortuoso presenta una bibliografía de unos 125 libros sobre astrología compuesto por 12 autoridades. Hugo describe con detalle dos libros de Aristóteles, uno de los cuales, en 25 capítulos, se ocuparía de la astronomía, mientras que el otro aportaría como ejemplo los horóscopos de 12.000 personas. Añade un libro de interrogantes en 42 capítulos, que podrían ser el origen de los *Iudicia* latinos atribuidos a Aristóteles y otro libro sobre natividades.

Tras exponer las latitudes planetarias, estaciones, ortos y ocasos solares, movimientos y nodos, ascensiones oblicuas, determinación del ascendente y otros conceptos astronómicos de utilidad para los astrólogos, define términos y conceptos de uso en astrología y describe los 12 lugares astrológicos. Del *Liber Aristotilis* se conservan sólo dos manuscritos, ambos en la Biblioteca Bodleyana de Oxford.

No lejos de Tarazona, en Tudela florecieron en torno a 1141 los judíos Abraham ben Ezra y Judah Halevi. Pudieron entablar contacto con Hermann de Carinthia y Robert de Ketton, que, procedentes de allende los Pirineos, habían venido urgidos por el saber árabe. Hermann conocía muchas de las fuentes de Hugo y tal vez tuvo acceso a la biblioteca de Banu Hud. En su principal obra original, la cosmogonía que lleva por título *De essentiis,* Hermann cita la Tablilla Esmeralda tomada del *Secreto de la creación* y alude a otras producciones herméticas. Opone “secretos” a “enseñanza pública”. Se pregunta si es justo revelar los arcanos recupe-

Página del manuscrito medieval del Quadrans vetus *conservado en la Biblioteca Británica de Londres (Harley 3735)*

rados. Tiene miedo de cometer el crimen de Numenio, quien divulgó los misterios eleusinos y vio luego en sueños, prostituidas a la luz del día, a las diosas. Para su ventura, la diosa Minerva, también en sueños, le asegura que sus atributos no quedan marchitados por dejarlos al alcance de todos. Hermann y Robert envían a Europea su cosecha española. Robert promete a Pedro el Venerable, adalid de la reforma cluniacense, "un regalo celeste que abraza en su seno toda la ciencia", es decir, una obra sobre astronomía, mientras que Hermann remitió una de sus traducciones (el *Planisferio* de Ptolomeo) a Thierry de Chartres.

Diez o veinte años después del proyecto de Robert y Hermann, se acometió un programa de traducción todavía más ambicioso, esta vez en Toledo. El impulsor de este programa parece haber sido Domingo González. Aborda la distintas disciplinas en *De scientiis*, apoyándose en la traducción que Gerardo de Cremona hizo de la *Clasificación de las ciencias* de al-Farabi. Con Domingo y Gerardo se expande el abanico de obras traducidas sobre medicina, física y filosofía. A la muerte del segundo, en 1187, sus discípulos sacaron una lista de sus muchas traducciones del árabe que, por humildad, no había firmado. Entre éstos, Juan de España, quien nos introduce, ya en el siglo XIII, en el nacimiento de la "traducción oficial". Michael Scot vertiría en 1217 *Sobre el movimiento de los cielos*, cinco años después del hundimiento almohade en las Navas de Tolosa.

A veces una obra documentada pierde credibilidad en la interpretación de los datos si busca justificar un prejuicio de partida. Roger French y Andrew Cunningham se han servido de copiosa información para escribir *Before Science. The Invention of the Friars' Natural Philosophy* con el fin de mostrar que a las emergentes órdenes mendicantes no les importaba la ciencia sino el uso beligerante de la misma. Quizá los autores hubieran visto las cosas con menos ardor guerrero tras la reflexión sobre el sentido medieval del cultivo del saber —*studiositas*— y el significado de la naturaleza (sacralizada por ellos en una confusión de planos que a Alberto y a su discípulo comentarista de Aristóteles les hubiera repugnado). Al reducir la Escuela de Chartres a poco menos que corriente gramatical, deprecian el movimiento regenerador del siglo XII. La tesis defendida aquí es que no se reconoció la autonomía de la naturaleza, sino que todo estaba envuelto por lo sagrado. No habría una filosofía natural, siendo rigurosos en el razonamiento, sino una teología natural.



Personificación del Sol. Manuscrito del siglo VIII del De cursu stellarum *de Gregorio de Tours*

Pero quizá los autores no quieran llegar tan lejos. Se limitan a repetir lo ya grabado en los manuales: los dominicos defienden la enseñanza del nuevo Aristóteles, naturalista en buena medida, y destaca en los franciscanos su aportación al desarrollo de la matemática y la óptica. La filosofía natural, renovada por ambos institutos religiosos, se convirtió en un instrumento de insólito valor dialéctico y apologético.

La Europa de comienzos del siglo XIII había entrado en un proceso de enriquecimiento. Con el arado de rueda se roturaron nuevas tierras, mientras molinos de agua y viento dominaron el paisaje. El collarín y la herradura de las bestias de tiro multiplicaron su trabajo. Ante el lujo incipiente de la ciudad, los cátaros abrazaron voluntarios la pobreza. La austeridad y preparación de éstos constituía una denuncia permanente de los vicios en que habían caído ciertos estamentos eclesiales. Pero no sólo se discrepaba en el modo de vida; la doctrina constituía el principal punto de conflicto. Para combatirlos con sus propias armas, los franciscanos llevan la menesterosidad a un grado ejemplar y los dominicos se aplican al estudio.

En torno al 1200 aparece también el embrión de las universidades, el *studium*. Se abrió el de París en los años noventa del siglo XII, algo más tarde en Oxford y en Cambridge en 1209. A mediados del siglo XIII, estos

studia contaban con varias facultades. La básica era la de artes, desarrollada sobre los cimientos de las siete artes liberales. Pronto, sin embargo, su contenido se sustituyó por la filosofía natural, la filosofía moral y la metafísica. Pero la recuperación y asimilación de Aristóteles provoca las primeras polémicas. David de Dinant argumenta que la materia, el alma y Dios son lo mismo.

Pero Dinant no arrastraba masas. Otra cosa era el dualismo maniqueo de los cátaros cuya fuerza amenazó con romper la unidad religiosa de Occidente. De acuerdo con el catarismo habría un doble principio, uno bueno y otro malo. Las cosas materiales y las satisfacciones de los sentidos, el propio cuerpo y la naturaleza eran obra del mal. En su réplica, los dominicos que se les opusieron se fundaban en razones filosóficas, extraídas de Aristóteles, en particular la unicidad de la última causa de todo cambio o movimiento, es decir, de todo lo que existe. Motor inmóvil que se confunde con el Bien; por tanto, salida de sus manos, la naturaleza ha de ser buena.

A la situación de la ciencia en la centuria siguiente nos acercan una miscelánea (*Texts and Contexts in Ancient and Medieval Science*) y una monografía (*Johannes de Muris,* De Arte Mensurandi). *Texts and Contexts* rinde homenaje a John E. Murdoch, estudioso de la figura de Bradwardine y de la idea de continuo en filosofía y matemática. En su colaboración, Michael McVaugh vuelve una vez más sobre el galenismo de Montpellier, en esta ocasión a través de la edición latina del *De cognitione propriorum defectuum et viciorum*. Y William A. Wallace torna sobre Domingo Soto, de quien edita las leyes del movimiento extraídas del comentario del español a la *Física* de Aristóteles. Soto, se demuestra aquí, estaba familiarizado con la doctrina de la proporcionalidad según Bradwardine. Hace varios decenios, Wallace resaltaba el hallazgo de Soto sobre el movimiento de los graves, “uniformiter difformis”.

Wilbur Knorr realiza en “The Latin Sources of *Quadrans vetus*: What They Imply for Its Authorship and Date” un trabajo modélico de investigación. Compara textos paralelos de obras distintas para determinar la autenticidad del autor. El de *Quadrans vetus* no fue quien se suponía, Robertus Anglicus. Escribió éste un comentario al *De spera* de Sacrobosco. Pues bien, mientras que el *Quadrans vetus* es conciso y directo, el comentario es prolijo y formalista; el comentario abusa de los gerundios, el *Quadrans vetus* no. Por otro lado, el comentario sobre *De spera* y el *Quadrans vetus* tienen pasajes muy parecidos sobre métodos para hallar la latitud. Tras sutiles comparaciones, Knorr concluye que tales textos proceden de otro anterior, *Artis cuiuslibet consummatio*. Mas, puesto que el comentario sobre *De spera* tiene sólo partes de *Artis* que se encuentran también en *Quadrans vetus*, síguese que el comentario debe ser posterior al *Quadrans vetus* y depender de éste. Sugiere que el *Quadrans vetus* era un manual universitario de París. Si ello es cierto, habrá que revisar el estereotipo de una universidad medieval alejada de toda aplicación científica.

Edith Sylla argumenta en “Thomas Bradwardine’s *De continuo* and the Structure of Fourteenth-Century Learning” que el contexto teológico aporta el necesario trasfondo para entender las ideas de Henry de Harclay sobre las relaciones entre indivisibles y continuos. Según una larga tradición argumentativa, el mundo no debía haber existido siempre, salvo caer en paradojas sobre infinitos. Para desembarazarse de esa malla teorética, Harclay esgrimía la desigualdad de infinitos: las revoluciones infinitas de la luna en un tiempo eterno podría ser a la vez infinita y doce veces más numerosa que las revoluciones infinitas del sol.

Menos especulativo era el manual de geometría de Johannes de Muris, su *De Arte Mensurandi*. Para encuadrarlo Busard hace un repaso exhaustivo de la bibliografía medieval. Empieza por la *Geometria incerti auctoris*, inspirada en los agrimensores, donde se nos enseña la medición de la altura de una torre y la profundidad de un pozo. Con la traducción del *Zij al-sindhind* de al-Khwarizmi por Adelardo de Bath se aprende el cálculo y manejo de las tablas.

Para familiarizarse con la geometría árabe en Occidente antes de la difusión de la ciencia árabe, cita Busard la *Practica geometriae* atribuida a Hugo de San Victor, que presenta los métodos de calcular y medir utilizados en *altimetria* (medición de alturas y profundidades), *planimetria* (medición de longitudes y anchuras de superficies) y *cosmimetria*. Exige conocer las propiedades de los triángulos y más precisamente las de triángulos rectángulos. Ejemplifica la tradición gromática árabe en el *Liber embadorum* de Abraham bar Hiyya, donde se exponen las definiciones, postulados y axiomas de Euclides, la medición de cuadrados, rectángulos y demás figuras, la división de superficies y volumen.

Amplia difusión alcanzará el *Artis cuiuslibet consummatio*. Se adapta a la división medieval de la geometría en planismetría, altimetría y crassimetría. Pero agrega el cálculo con fracciones, comunes y sexagesimales, o, en la terminología del autor, fracciones geométricas y astronómicas. Y dedica una sección sobre el uso de instrumentos para hallar las alturas de las torres en circunstancias variables, así como abundante material astronómico. Pero no llegó a innovar tanto como la *Practica geometriae* de Leonardo Fibonacci. Además de ocuparse de áreas, alturas y volúmenes medidos con diversos instrumentos, Leonardo aporta también secciones sobre raíces cuadradas y cúbicas, sobre la división de campos entre asociados, sobre arcos y cuerdas y sobre algunas soluciones algebraicas a problemas geométricos.

En la *Practica geometrie* bebió el *Quadrans vetus* o *Tractatus quadrantis*. El autor del tratado sobre el cuadrante separa la geometría en teórica y práctica, que subdivide a su vez en altimetría, planimetría y estereometría. A imitación suya Prophatius Iudaeus redactó el *Quadrans novus*. A comienzos del siglo XIV Richard de Wallingford aborda en *Quadripartitum* los fundamentos de trigonometría, requerida para la resolución de problemas de astronomía esférica. El *Quadripartitum* podría considerarse en justicia el primer tratado medieval sobre trigonometría, escrito en Europa, al menos fuera de España y del Islam.

En torno a 1344 Johannes de Muris, dio término al *De Arte Mensurandi*. Consta de doce capítulos; los cuatro primeros y el comienzo del quinto habían sido escritos ya por otro autor; atienden al conocimiento matemático necesario para la astronomía (operaciones sobre fracciones sexagesimales y trigonometría). De Muris toma las riendas en el capítulo V, parte 1, proposición nona. La predilección del autor original por las consideraciones trigonométricas hacen verosímil que estuviera interesado por la astronomía. De Johannes de Muris son, entre otros apartados, la medición del círculo, del cubo, octaedro, icosaedro, amén de las razones de círculo a diámetro. Pero la obra matemática más famosa es su *Quadripartitum numerorum*. Importa sobremanera el libro cuarto, dedicado a las aplicaciones prácticas de la aritmética, la mecánica en particular.

LUIS ALONSO

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LOS CUMULOS DE GALAXIAS Y SU EVOLUCION, por J. Patrick Henry, Ulrich G. Briel y Hans Böhringen

Los objetos del firmamento que alcanzan una masa mayor son cúmulos de galaxias y gas que se han ido congregando a lo largo de miles de millones de años. ¿Llega a su fin ese proceso de aglomeración?

LOS FISICOS JAPONESES DURANTE LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL, por Laurie M. Brown y Yoichiro Nambu

En los años más difíciles de la historia del Japón surgieron dos grandes escuelas de física teórica.

LA OBTENCION DE RAYOS X ULTRALUMINOSOS, por Massimo Altarelli, Fred Schlachter y Jane Cross

Una radiación mil millones de veces más brillante que la del Sol ilumina fenómenos científicos y técnicos.

OPALOS Y CRISTALES FOTONICOS, por Francisco J. Meseguer, Ceferino López, Hernán Míguez, Joaquín Requena y José Serafín Moya

La fabricación de ópalos artificiales a partir de microsferas de silicio ha abierto el camino para la obtención de cristales de luz, base del futuro desarrollo de la fotónica.

LA LUCHA CONTRA EL CANCER DE PROSTATA, por Marc B. Garnick y William R. Fair

Avances recientes en el diagnóstico y tratamiento de la enfermedad auguran mayor esperanza y calidad de vida para muchos pacientes.

DRAGONES MARINOS, por Paul Groves

Maestros del camuflaje se distinguen por su voracidad depredadora. Son una de las contadas especies en que el macho realiza la gestación.

UTILIDAD DE LA CLONACION EN MEDICINA, por Ian Wilmut

Entrada ya la clonación de mamíferos en la rutina de laboratorio, la investigación explora formas imaginativas del aprovechamiento de la técnica.

RECONSTRUCCION Y MEJORA DE INSECTOS, por David A. O'Brochta y Peter W. Atkinson

La inserción de nuevos genes en determinadas especies de insectos podría detener algunas enfermedades infecciosas, beneficiar a la agricultura y producir materiales innovadores.

EVALUACION DEL TAMAÑO DE LOS PROGRAMAS, por Capers Jones

A diferencia del petróleo, el acero o el papel, los programas informáticos constituyen bienes intangibles. Esta esquiva peculiaridad hace difícil su cuantificación.

